Tijdschrift van het
Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
DEEL 30 No. 5-6 1965

Het belang van ruimtecommunicatie

door J. L. Bordewijk *)

Voordracht gehouden voor het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap en de Sectie voor Telecommunicatie-techniek van het K.I.V.I. op 27 januari 1965.

De rakettentechniek met als boeiend vervolg de ruimtevaart – geboren in een ongekende worsteling om het beheersen van de ruimte — hebben de communicatie-ingenieur de mogelijkheid van een revolutionaire vernieuwing van het intercontinentale radioverkeer met behulp van zwevende relaisstations in handen gegeven. Verschillende van deze, grotendeels nog experimentele, satellieten of kunstmanen hebben onder hun codenamen als: Echo, Telstar, Relay, Syncom grote bekendheid verworven.

Omgekeerd heeft de communicatie-ingenieur zijn steentje bijgedragen tot het welgeslagen van de eerste ruimtevaartexperimenten o.a. door het verschaffen van afstandsmeet- en besturingsapparatuur.

De toepassing van communicatie via satellieten als bedoeld in het eerstgenoemde geval wil ik in het volgende aanduiden als "*ruimtecommunicatie in primaire zin*", daarmede aangevend, dat als primair doel een massatransport van informatie, dat wil zeggen van een variëteit van grote aantallen signalen zoals telefoon- en telegrafiesignalen of van een signaal met zeer grote bandbreedte zoals een televisiesignaal voor ogen staat. In het tweede geval zal ik spreken over "*ruimtecommunicatie in secondaire zin*" daarmede geenszins een geringer belang willende aanduiden, doch tot uitdrukking brengend de gerichte toepassing van communicatietechniek als hulpmiddel bij een andere techniek, n.l. die van het transport van materie in de ruimte, waarbij de hoeveelheid informatie die per seconde moet worden overgebracht veelal relatief klein is en waarbij het communicatiekanaal aan het zeer speciale ruimtedoel kan worden aangepast.

Onder communicatie in secondaire zin kunnen wij ook rangschikken de elektronische kunstmaan-navigatiestelsels, waarmede

*) Technische Hogeschool, Delft.

men in Amerika experimenteert en de overbrenging van meteorologische- of astronomische waarnemingsgegevens vanuit kunstmanen naar de aardse meteorologische centra.

Bij de ruimtecommunicatie in primaire zin gaat het dus over de "world wide", de "intercontinentale" ofwel de "primaire informatieverkeerswegen", bij ruimtecommunicatie in engere zin om de genoemde ondersteuning van andere technieken zoals die van het materietransport dan wel die van toegepast of zuiver wetenschappelijk onderzoek van alles wat onze aarde omgeeft. Intercontinentale communicatie in primaire zin kan — nu sedert 1956 een 3-tal transatlantische telefoonkabels en een 2-tal stilleoceaankabels men een gezamenlijke capaciteit van enkele honderden telefoongesprekken in dienst zijn gesteld — met zeer goede kwaliteit ook op andere wijze dan met kunstmanen worden bedreven. Deze transatlantische kabelsystemen zijn echter kostbaar en laten tot nu toe geen kleurentelevisietransport toe.

Ze zijn ook minder flexibel in zoverre, dat ze niet een gezamenlijk gebruik ten behoeve van een koppeling tussen meerdere continenten toelaten. Het intercontinentale verkeer vertoont echter een sterke groei van circa 20°/₀ per jaar of wel een verdubbeling in circa 5 jaar. Interessant is de observatie, dat ook de verbetering in kwaliteit ten opzichte van de vroegere kortegolfverbindingen daartoe in sterke mate heeft bijgedragen. Zo deelt Halsey, pionier op het gebied der onderzeese kabelverbindingen, mede, dat na de inbedrijfstelling van de kabelverbinding Londen-Sydney het aantal gesprekken tussen Londen en Sydney met een factor 2 à 3 aangroeide, terwijl de gemiddelde gespreksduur met 20°/₀ toenam, een ervaring die ook op de transatlantische route is opgedaan. Deze snelle groei betekent, dat zonder andere verkeersmiddelen in de komende jaren enorme kapitalen geinvesteerd zullen moeten worden op de bodem der oceaan: Londen-Sydney, 30.000 km zal bij f 50.— per meter op 1,5 milliard gulden komen. Er was dan ook alle reden om uit te zoeken in hoeverre satellietcommunicatie een even goed of beter alternatief is in het intercontinentale informatietransport.

Op basis van de eerste resultaten van dit onderzoek mag het volgende gesteld worden:

a. Er is een redelijke hoop, dat satellietcommunicatie kan concurreren met kabelverbindingen. Zo zal reeds de eerste 240 telefoonkanalenverbinding Early Bird, die men in 1965 tussen Amerika en Europa in dienst wil stellen, 2 à 300 millioen dollar aan inverstering vergen, een bedrag dat in redelijke

orde van grootte ten opzichte van kabelverbindingen ligt.

b. Satellietverbindingen hebben vergeleken met kabelverbindingen een andersoortige kwetsbaarheid. De transatlantische kabels zijn in ondiep water een aantal keren door vissersschepen vernield. Bij satellietverbindingen moet men een hoeveelheid verliestijd verwachten in bepaalde ongunstige posities van de satelliet(en).
Satellietverbindingen zullen vooral indien men er in slaagt een zgn. „meervoudige toegang" tot de eigenlijke satelliet te realiseren een groter verkeersaanpassingsvermogen vertonen.

d. Satellietverbindingen laten transport toe van een bandbreedte voldoende voor een videosignaal, hetgeen bij lange kabelverbindingen nog nooit vertoond en alleen mogelijk te maken is bij een veel groter aantal onderzeese versterkers dan tot nu toe technisch realiseerbaar was.
Een technisch bezwaar, dat niet voor televisie en telegrafie, maar wel voor tweezijdige telefoongesprekken geldt, is de grote looptijd verbonden aan het gebruik van zgn. „hogebaan satellieten" zoals Early Bird er een zal zijn. Maar er bestaan een aantal goed uitvoerbare zgn. „lage-baan-oplossingen", die dit bezwaar niet kennen en qua kwaliteit volledig kunnen concurreren met de kabelverbindingen.

In hoeverre, kan men zich vervolgens afvragen, bestaan er voor ons eigen land behoeften tot directe deelname — hetzij louter financieel, hetzij door het stichten van een Nederlands grondstation — aan satellietcommunicatie. Hoewel vanuit Nederland (Kootwijk, Nera) directe kortegolf-radioverbindingen met diverse landen werden onderhouden en worden onderhouden — voor zoverre ze niet konden worden vervangen door kabelverbindingen — is het transatlantisch verkeer met Nederlandse bestemming tot nu toe nog niet van dien aard, dat deelname laat staan het, zelfs in overleg met de Amerikaanse partner, leggen van kabels economisch te motiveren is.

De Nederlandse PTT heeft volstaan met het huren van enkele telefoon kanalenin de door anderen geëxploiteerde kabels. Men kan zich nu afvragen, of bij de komst van het nieuwe verkeersmiddel satellietcommunicatie niet een zelfde houding past en of we de rol van „informatievaarder" van Europa niet beter aan de grotere landen Engeland, Frankrijk, Duitsland zullen kunnen toevertrouwen, die ook in de „Early Bird"-verbinding met de in deze landen opgebouwde grondstations: Goonhilly, Raisting en Pleumeur-Bodou zullen meespelen met op de achtergrond de ex-

perimentele stations van Italië en de Scandinavische landen.

Ik zal met u geen verstoppertje spelen en meteen maar bekennen, dat een passieve houding mij niet zou bevallen. En dat een veelheid van deels objectieve, deels — ik geef het op voorhand toe — subjectieve overwegingen, waarvan ik er graag een aantal hier zou willen opvoeren als sluitstuk van mijn inleiding tot deze ruimtecommunicatie, waarvoor we zo gelukkig zijn geweest — en ik spreek nu als bestuurslid van het NERG — op het gebied van de ruimtecommunicatie in primaire zin zowel als op dat van de ruimtecommunicatie in secundaire zin zulke vooraanstaande sprekers uit het buitenland en uit het binnenland te kunnen aantrekken.

Overwegingen van technisch-economische aard:

- Binnen 10 à 20 jaar zal bij de verwachte groei het Nederlands intercontinentaal verkeer wel van een omvang zijn, die een eigen grondstation motiveert.
- reeds nu geldt echter, dat een eigen verbinding, althans eigen toegang tot één of meer satellietstations de extra stoorkansen van transitoverkeer door andere landen, waaronder men ook algemene zaken als stakingen moet begrijpen, vermindert en de eigen financiële positie bij tariefdiscussies vergroot, zoals frequent is gebleken o.a. bij de vaststelling van de tarieven voor het zgn. Eurovisienet.
- om technisch op de hoogte te raken en te blijven is een bescheiden experimenteel begin door het voorgaande nu reeds gemotiveerd.

Overwegingen van technisch-wetenschappelijke aard:

- voor een goed evenwicht zal het Nederlandse wetenschappelijk ruimteonderzoek zich verzekerd moeten weten van technische hulp van Nederlandse origine en omgekeerd zal het ruimteonderzoek-resultaat mede ten goede moeten komen aan de Nederlandse technische activiteit, die daartoe dan uiteraard wel moet existeren. M.a.w. een gebalanceerd beleid, dat gelden voteert voor ruimteonderzoek zal dat ook doen voor de twee belangrijke takken van de *ruimtetechniek*, te weten de *ruimtevaart* enerzijds en de *ruimtecommunicatie* anderzijds.
- het meespelen in de Europese lichamen
  als ESRO (European Space Research Organisation) door diegenen in Nederland, die zich met ruimteonderzoek bezig houden — en dat gebeurt uiterst verdienstelijk en met redelijke middelen;

als ELDO (European Launcher Development Organisation) door diegenen in ons land, die zich met ruimtevaart willen bemoeien;
als CETS (Conférence Européenne sur les Télécommunications Spatiales en
als CEPT (Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications) door degenen, die zich aan ruimtecommunicatie willen wijden, dient te worden gedragen door een voldoende nationale activiteit, wil het zinvol zijn en niet leiden tot het *exporteren van goede ingenieurs*,

Overwegingen van onderwijskundig-economische aard:

- het is voor een voldoend technisch onderwijsniveau nodig Nederlandse technische studenten met de modernste technische middelen te laten werken tijdens hun studie met de *garantie*, dat ze zich na hun studie op de betreffende gebieden in Nederland nuttig kunnen maken.
- voor het aantrekken van onderdelen van Europese organisaties in ons land — hoe verschillend men daarover moge denken — is een eigen technisch-wetenschappelijke bloei "conditio sine qua non".

Overwegingen van politiek-ideologische aard:

- de intercontinentale *informatie-heirbanen* zullen naarmate ze meer en meer geperfectioneerd worden de confrontatie van de continenten — eigenlijk van de beschavingssamenlevingen — in culturele zin verdiepen.
- het is in dit verband niet verwonderlijk, dat in recente publikaties en persverslagen Engeland-Australië wordt aangewezen als vragend om zo'n informatie-heirbaan.
- is het voor ons land, met de groei van de KLM voor ogen, met een verbindingspionier als dr. De Groot in onze historie, te fantastisch om te denken aan Indonesië?
- maar dan is het zaak *tijdig* ook in het internationale technisch-politiek-economisch overleg *goede stellingen* te betrekken.
- voor diegenen die twijfelen aan de mogelijkheden en rechten van ons kleine land zij verwezen naar artikel 1721/XVI van het Handvest der Verenigde Naties, dat zegt: "The principle of full liberty should be applied to the exploration and use of space".

Manuscript ontvangen op 22 december 1965.

Telecommunicatie met behulp van kunstmatige aardsatellieten

door L. R. M. Vos de Wael *)

Voordracht gehouden voor het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap en de Sectie voor Telecommunicatie-techniek van het K.I.V.I. op 27 januari 1965.

Summary

After the first satellite was launched on October 4th 1957, a tremendous development, with a recent stimulant to use satellites for telecommunication purposes, took place.

A survey is given of the restricted possibilities of „classical radio" for telecommunication. Satellite systems are classified in various ways; the adventages and disadventages of each class are given. The requirements and the selection of the most useful frequency bands for communication via satellites are outlined. A short survey is given of some systems studied for practical use, the importance is shown of the choice of parameters for a given possible system with regard to outages due to a defective satellite and the influence of the choice of orbits on the earth-coverage of the system.

In conclusion some details are given of the synchronous satellite „Early Bird".

1. Inleiding

Indien men in een rustig ogenblik zijn gedachten eens laat gaan over de vooruitgang die zowel in de wetenschap als in de techniek gedurende de laatste 10 à 15 jaar heeft plaats gevonden, zullen ongetwijfeld velen in verbazing komen over de vele opvallende resultaten die zijn bereikt. Kunstmatige aardsatellieten zijn enerzijds mogelijk geworden door deze vooruitgang, terwijl zij anderzijds geheel nieuwe en nog ongekende perspectieven hebben geopend, zowel voor wetenschappelijk onderzoek als voor praktisch gebruik.

Kenmerkend voor aardsatellieten is dat zij kennis en toepassing vereisen van vele en sterk uiteenlopende onderdelen van wetenschap en techniek. De raketten die ze voortstuwen tot in hun baan roepen problemen op uit de aerodynamica, de materiaalkunde (sterkte, lichtgewicht, hittebestendig), de hemelmechanica, de elektronische rekenwijzen (voor hun baanbepaling) en

*) Dr. Neher Laboratorium, PTT. Leidschendam.

de cryogene technieken; de apparatuur in de satelliet maakt gebruik van de ontwikkeling van de vaste-stoffen-natuurkunde, met name de halfgeleiders, terwijl de bij transistoren en dioden ontwikkelde technieken de toepassing van geïntegreerde schakelingen met hun lichtgewicht en minitieuze afmetingen mogelijk maken. In de grondstations vindt de diepere kennis omtrent de innerlijke eigenschappen van molecule en atoom toepassing in de zeer ruisarme versterkers, de z.g. masers. Een gelijksoortige ontwikkeling bij frequenties van het licht, de laser, kan misschien in de toekomst nog toepassing vinden.

Niettegenstaande de praktische verwezenlijking van kunstmatige aardsatellieten slechts sinds enkele jaren mogelijk is, zijn de hiermede verband houdende vraagstukken en nieuw opgeworpen problemen schier ontelbaar. De eerste satelliet de Russische Spoetnik werd op 4 oktober 1957 gelanceerd, nog slechts ruim 8 jaar geleden. Op 1 februari 1958 volgde de eerste geslaagde Amerikaanse lancering met de Explorer I. Sindsdien zijn vele satellieten van verschillende soorten in uiteenlopende banen gelanceerd. Ofschoon de Russen de eersten waren, en de wereld onmiddellijk in verbazing brachten door het hoge gewicht van hun satelliet zijn de door de Verenigde Staten bereikte resultaten, zowel op een breed wetenschappelijk gebied, als met praktische toepassingen bijzonder groot.

Als we verder de stand van het ogenblik nagaan dan blijkt dat de Amerikaanse satellieten die nog in hun baan lopen aanzienlijk talrijker zijn dan de Russische. Van de satellieten die vóór 1963 gelanceerd zijn is het aantal Amerikaanse dat „nog in leven" is een veelvoud van het Russische. De oudste nog in leven zijnde satelliet is de Explorer I, gelanceerd op 1 februari 1958. De Vanguard I, gelanceerd op 17 maart 1958 zendt nog steeds radiosignalen uit, een opmerkelijke prestatie, waarmede men uiteindelijk niet zo gelukkig is, men zou hem liever de mond snoeren, omdat hij nutteloos een frequentiebandje in beslag neemt[1]). Internationale overeenkomsten voorzien er nu ook in dat radiouitzendingen vanuit satellieten, vanaf de grond gestopt kunnen worden.

De meeste satellieten zijn gebruikt voor wetenschappelijk onderzoek, waarvan verschillende met praktische toepassingen zoals voor de metereologie (Tiros, Nimbus, wolkenfoto's) of plaatsbepaling op zee (Transit). Eerst de laatste paar jaar wordt

[1]) Inmiddels heeft deze satelliet kort geleden de uitzendingen gestaakt.

ernstig gestreefd naar toepassing voor telecommunicatie.

2. Communicatie-aspecten

De behoefte aan telecommunicatie-verbindingen neemt nog steeds sterk toe. Het aantal telefoonaansluitingen over de gehele wereld bedraagt op het ogenblik ca. 135 millioen; hiervan zijn er 76 millioen in de USA; 34 millioen in Europa. Het „westen" heeft ruim 110 millioen aansluitingen, dat is ca. 80% van het geheel. De vraag naar transatlantische gesprekken neemt exponentieel toe, men verwacht in 1970 een verdrievoudiging tot ruim 10 millioen gesprekken per jaar. Daarnaast zijn er dan nog de telegraafverbindingen, die door uitbreiding van het telexverkeer, de datatransmissie en misschien de facsimili, steeds meer kanalen vergen.

Voor het verwezenlijken van deze verbindingen staan ons in het algemeen ten dienste, enerzijds de kabels en luchtlijnen, anderzijds de radio. Voor het transoceanisch verkeer was men tot voor enkele jaren praktisch uitsluitend op de radio aangewezen. Onder de druk van de voortdurend stijgende vraag naar telecommunicatiekanalen heeft het voor het radioverkeer in gebruik genomen frequentiespectrum zich steeds meer uitgebreid.

Figuur 1 geeft een overzicht van dit voor het radioverkeer gebruikte frequentiespectrum. Het loopt van een golflengte van ca. 30 km, dat is een frequentie van 10 kHz, tot in het mm-gebied. Toepassing van „laser"-technieken vergroot dit spectrum nog verder. Voor transoceanisch verkeer komen alleen in aanmerking de km-golven van ca. 30–5 km (10–60 kHz) en de decameter-golven van ca. 60–10 m (5–30 MHz), het zogenaamde kortegolfgebied. De eerste groep is praktisch vrijwel alleen geschikt voor telegrafieverkeer met lage seinsnelheden. Zeer grote zendvermogens tesamen met hoge en uitgebreide antennenetten zijn hierbij noodzakelijk. Bijna het gehele transoceanische radioverkeer wordt afgewikkeld op korte golf.

De sterk groeiende behoefte aan telecommunicatie-kanalen heeft een bijzonder intensief gebruik van het beperkte frequentiespectrum tot gevolg. Soms is het een strijd met grote vermogens en een ononderbroken uitzending (ook als er geen verkeer is) als wapen. Er zijn evenwel in internationaal overleg een aantal regels opgesteld waaraan men zich min of meer houdt.

De zelfstandig geworden gebieden in Afrika en elders zullen

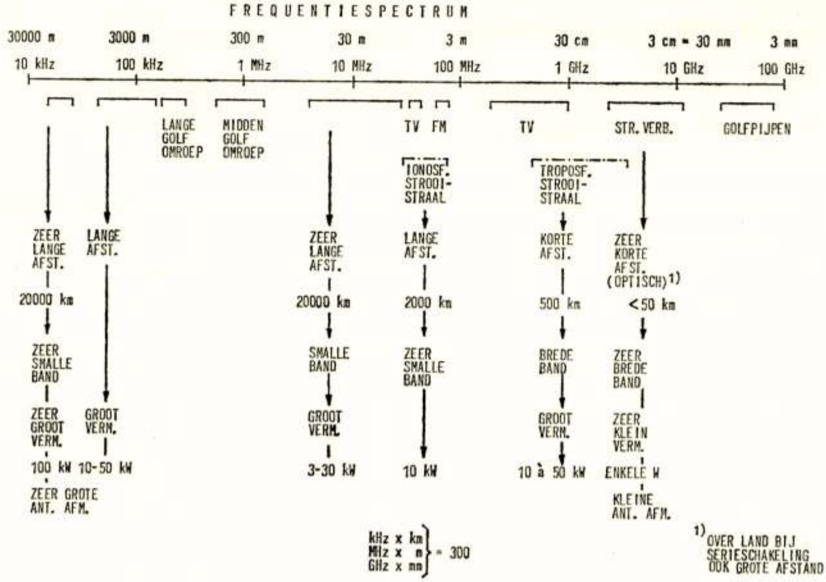


Fig. 1
Het gebruik van het frequentiegebied van 10 kHz-100 GHz voor telecommunicatie

voorts ook hun plaats in het frequentiespectrum te midden van de overige naties, opeisen.

Door de ontwikkelling van de zeekabel in de laatste jaren zijn de mogelijkheden echter toegenomen. Afgezien van economische overwegingen kan men het aantal gewenste kanalen vrijwel onbeperkt opvoeren door het bijleggen van meer kabels. Dit staat in tegenstelling tot de huidige radioverbindingen, waar het aantal kanalen uiteindelijk beperkt is.

Het radioverkeer is bovendien nogal kwetsbaar door grillen van de ionosfeer. De beruchte „Dellingers", waardoor vrijwel het gehele korte-golfradioverkeer gedurende b.v. een half uur of langer wordt lam gelegd, zijn bekend genoeg.

Kunstmatige aardsatellieten bieden nu geheel nieuwe mogelijkheden voor telecommunicatieverkeer over grote en zeer grote afstanden. Het aantal kanalen dat hiermede ter beschikking komt kan de verkeersbehoefte voor een groot aantal jaren opvangen. Daarenboven heeft de grilligheid van de ionosfeer er veel minder vat op. Het idee op zichzelf is niet nieuw. Reeds in 1945 is door Clarke in Wireless World een voorstel hiertoe gedaan. Voor een rechtstreekse directe TV-uitzending over de oceaan is uitzending via een satelliet praktisch de enige mogelijkheid.

3. **De wetten van Keppler**

De banen van satellieten worden in hoofdzaak bepaald door de wetten van Keppler, die zijn opgesteld om de banen van planeten te beschrijven. Deze wetten luiden:

1. de baan van een planeet is een ellips waarvan de zon één der brandpunten is.
2. in deze baan doorloopt een voerstraal gelijke perken in gelijke tijden.
3. er is een vaste verhouding tussen de 2e macht van de omlooptijd tot de 3e macht van de afstand.

$$T^2 = a\,d^3 \quad \text{of} \quad \left(\frac{T}{p^3}\right)^2 = a\left(\frac{d}{p^2}\right)^3$$

T = omlooptijd
d = afstand tussen de middelpunten
a = constante
p = evenredigheidsfactor

Met deze laatste formule kan men eenvoudig omlooptijden en afstanden omrekenen. Bijvoorbeeld:

Voor de maan is $T = 27$ dagen; $d = 380.000$ km. Kiezen we $p = 3$, dan is $\frac{27}{3^3} = a\left(\frac{380.000}{3^2}\right)$ of $1 = a \,.\, 42.000$

m.a.w. bij een omlooptijd van 1 dag (24 uur) is de afstand (tot het middelpunt van de aarde) 42.000 km, d.w.z. de hoogte boven de aarde is 36.000 km (synchrone satelliet). Kiezen we nu $p = 2$ dan vinden we voor een omlooptijd van $\frac{24\text{ (uur)}}{2^3} = 3$ uur een afstand van $\frac{42.000}{2^2} = 10.500$ km, d.w.z. een hoogte van 4500 km boven de aardoppervlakte.

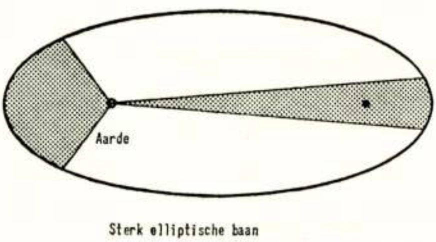


Fig. 2
Sterk ellipsvormige baan; de wet van de perken (2e wet van Keppler) de gearceerde oppervlakken zijn gelijk

De 2e wet leert dat in gelijke tijdintervallen de oppervlakken ingesloten door de betreffende voerstralen en de hierbij behorende bogen gelijk zijn (fig. 2). Hieruit volgt dat in een sterk elliptische baan het baangedeelte in de omgeving van het aphelium (het punt dat het verste verwijderd is van het brandpunt waarin de aarde staat) langzamer wordt doorlopen dan het er tegenover gelegen baangedeelte (perihelium).

Kiest men een sterk elliptische baan zodanig dat het aphelium b.v. ligt tegenover het gebied tussen USA en Europa dan is deze satelliet relatief lang beschikbaar voor een verbinding tussen deze punten. De stuwraket die deze satelliet in zijn baan brengt kan belangrijk kleiner zijn dan nodig is om de satelliet op deze zelfdehoogte in een cirkelvormige baan te brengen.

4. Indeling van satellieten

Men kan de soorten satellieten op verschillende wijze indelen, b.v. zoals aangegeven in de tabellen 1, 2 en 3.

BAANSOORT	BAANVORM
equatoriale baan	bijna cirkelvormig
polaire ,,	sterk elliptisch
hellende ,,	aarde ontsnappend

Tabel 1
Indeling van satellieten; baansoort, baanvorm

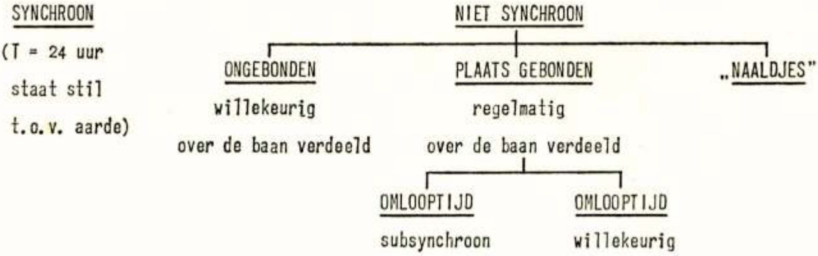
PASSIEF
(is in feite
een reflector)

ACTIEF
(bevat ontvanger
en zender)

- DIRECT ACTIEF
(zendt ontvangen signaal
onmiddellijk door)
- VERTRAAGD ACTIEF
(bevat geheugen)

Tabel 2
Indeling van satellieten; passief, actief

Een voorbeeld van een passieve satelliet is de „Echo" (I en II), een nylon ballon, bedekt met een zeer dunne aluminium folie, die in opgevouwen toestand door een raket in zijn baan wordt gebracht en daarna wordt „opgeblazen".



Tabel 3
Indeling van satellieten: synchroon, niet-synchroon

Een vertraagd-actieve satelliet bevat een ontvanger die een signaal (vanaf de aarde, of vanuit de ruimte, b.v. meetgegevens) opvangt, in een geheugen (b.v. een magneetband) bewaart en op een later tijdstip, na een commandosignaal vanaf de aarde, weer uitzendt. Voor telecommunicatieverkeer komt praktisch alleen de direct-actieve satelliet in aanmerking (b.v. Telstar, Syncom).

Van de niet-synchrone satellieten komen voor telecommunicatiedoeleinden voornamelijk de plaatsgebonden systemen in aanmerking voor telecommunicatieverkeer en dan bij voorkeur subsynchroon. Bij een subsynchrone satelliet in een equatoriale baan is een geheel veelvoud van de omlooptijd t.o.v. een bepaald punt op aarde gelijk aan 24. Een dergelijke satelliet komt steeds op dezelfde uren van de dag over.

Een satelliet die b.v. telkens na 12 uur overkomt heeft hierbij elke keer $1\frac{1}{2}$ maal zijn baan doorlopen. De eigen omlooptijd is dan $\frac{2}{3} \cdot 12 = 8$ uur, de hoogte boven aarde wordt dan ca. 14.000 km. Satellieten met een subsynchrone omlooptijd in een niet-equatoriale baan „trekken" op de aarde een bepaalde geprojecteerde baan die na een aantal omwentelingen steeds opnieuw wordt doorlopen. Het steeds op hetzelfde tijdstip overkomen van de satelliet vereenvoudigt de bedrijfsvoering op de grondstations. Voorts geven subsynchrone systemen een gunstige „bedekking" van het aardoppervlak (het gebied dat door een satelliet bestreken wordt).

Een synchrone satelliet beweegt zich op een zodanige hoogte (ca 36.000 km) in een equatoriaal vlak dat zijn omlooptijd gelijk is aan die van de aarde om zijn as. Hij staat dus stil ten opzichte van een punt op aarde. Een dergelijke satelliet omspant ruim $\frac{1}{3}$ van het aardoppervlak (fig. 3). Met 3 synchrone satellieten kan men de gehele aarde bestrijken, met uitzondering van

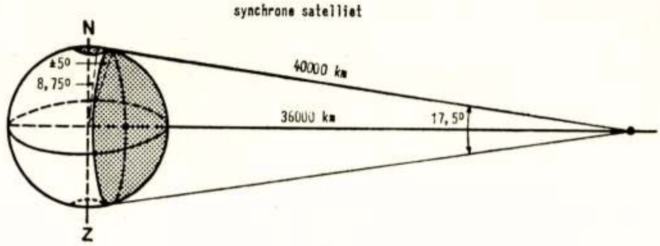


Fig. 3
Bedekking met een synchrone satelliet, werkingsgebied op aarde

een klein gebied rond de noord- en zuidpool (fig. 4). Een verbinding tussen twee tegenvoeters moet via twee sprongen plaatsvinden. Wil men ook nog de poolgebieden bestrijken dan zijn bovendien nog 3 satellieten in een polaire baan op dezelfde

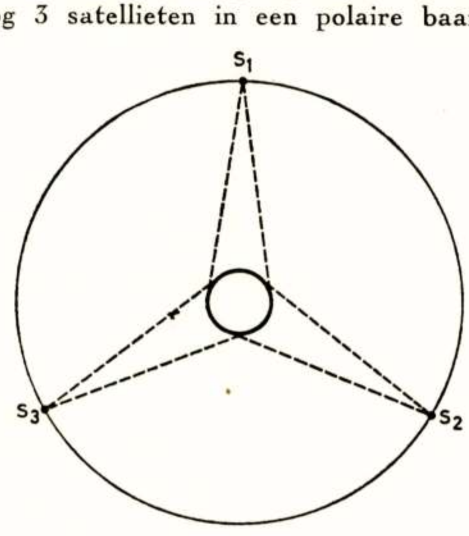


Fig. 4
Bedekking van de aarde met 3 synchrone satellieten

hoogte nodig. Deze zijn vanzelfsprekend niet-synchroon in bovengenoemde zin.

Kleine afwijkingen van de gewenste baan en van de plaats van de satelliet in de baan kunnen worden hersteld met behulp van korte gasstoten die uit straalpijpjes, na vanaf de aarde gegeven commando's, worden uitgestoten. De hoeveelheid meegevoerd gas is beperkt, zodat zuinigheid geboden is.

Een satelliet is „stand houdend" indien steeds hetzelfde vlak naar de aarde is gekeerd. Dit geeft de mogelijkheid een scherp-

PASSIEVE SATELLIET	ACTIEVE SATELLIET
VOORDELEN	
1) eenvoud, geen electronische apparatuur	middelmatig vermogen voor de aardse zender
2) brede frequentieband, waardoor een zeer groot aantal beschikbare kanalen	
3) meervoudig toegankelijk voor een groot aantal grondstations zonder onderlinge storing	
4) uitwijken in frequentie mogelijk bij storing	
NADELEN	
1) zeer groot vermogen voor aardse zender	1) minder bedrijfszeker wegens electronische en andere apparatuur
2) zeer grote antennes op grondstations	2) frequentie-transformatie in satelliet nodig
3) uiterste gevoeligheid voor aardse ontvanger	3) kostbaarder
4) afzonderlijke frequentieband voor elke richting	

Tabel 4

Voor- en nadelen van een passieve en een actieve satelliet

gerichte antennebundel, b.v. van een paraboolantenne, steeds naar de aarde gericht te houden. Hiermede kan een belangrijke winst van het door de satelliet effectief uitgezonden vermogen verkregen worden.

SATELLIET SYSTEMEN

ONGEBONDEN	PLAATS GEBONDEN
willekeurig over baan verdeeld	regelmatig over baan verdeeld
VOORDELEN	
1) eenvoud van apparatuur in satelliet (geen bijsturing)	1) on-onderbroken verbinding
2) langere levensduur	2) gering aantal satellieten nodig
3) meervoudige lancering eenvoudig mogelijk	3) bedrijfsvoering op grondstation eenvoudiger
4) minder eisen aan nauwkeurigheid van lancering	
5) minder kwetsbaar voor opzettelijke storing	
6) uitvallen van een satelliet niet byzonder ernstig	
NADELEN	
1) kans op onderbreken van verbinding (evenwel voorspelbaar)	1) apparatuur voor bijsturing in satelliet noodzakelijk
2) groot aantal satellieten nodig	2) kostbaarder
	3) kortere levensduur

Tabel 5

Voor- en nadelen van een ongebonden en een gebonden satelliet-systeem

SYNCHRONE SATELLIET	NIET SYNCHRONE SATELLIET
VOORDELEN	
1) slechts één antenne nodig voor on-onderbroken verbinding	1) korte looptijd van signalen
2) geringe bijsturing van antennebundel	
3) grondstation eenvoudiger en gemakkelijker bedrijfsvoering	
4) bestrijkt groot deel van aarde (ca 1/3 gedeelte)	
5) geen Doppler effect	
NADELEN	
1) lange looptijd van signalen	1) noodzaak overnemen verkeer van een satelliet op de volgende
	2) minstens 2 antennes nodig voor on-onderbroken verbinding
	3) antenne voortdurend in twee richtingen bijsturen
	4) uitgebreide electronische reken- en besturingsapparatuur nodig
	5) groot aantal satellieten vereist (afhankelijk van hoogte van satelliet)

Tabel 6
Voor- en nadelen van een synchroon en een niet-synchroon satelliet-systeem

Bij het „naaldjes"-systeem worden ca. een miljard halve-golf-dipooltjes in de vorm van uiterst dunne draadjes, met een lengte van b.v. 3,5 à 4 cm, in een baan om de aarde gebracht, waarin ze zich na verloop van tijd (enkele maanden) gelijkmatig over deze baan verdelen, Er ontstaat een soort frequentieselectieve, reflecterende ring; elk dipooltje is een afgestemde passieve reflector. Bij dit systeem kunnen voor een verbinding tussen twee grondstations de antennes steeds in dezelfde richting blijven staan. In dit opzicht biedt het systeem dezelfde voordelen als de synchrone satelliet. Een tweetal proefnemingen hebben geen resultaat opgeleverd, onder meer doordat de verspreiding van de dipolen faalde. Het systeem ondervond in de wetenschappelijke astronomische wereld nogal wat tegenstand uit vrees voor een zekere optische of radiografische „verduistering."

De tabellen 4, 5 en 6 geven een overzicht van een aantal voor- en nadelen van de verschillende systemen.

5. Van Allen gordels

Een der eerste wetenschappelijke resultaten welke met kunstmatige aardsatellieten werden verkregen was de ontdekking

stralingsgordels rond de aarde. Het zijn gebieden waarin zich grote hoeveelheden snelle elektrisch geladen deeltjes bevinden. Ze werden in 1958 waargenomen met de Amerikaanse satelliet Explorer I. Deze stralingsgebieden werden voor het eerst door Van Allen onderzocht en zijn naar hem genoemd.

Er blijkt een binnenste en een buitenste gordel te bestaan.

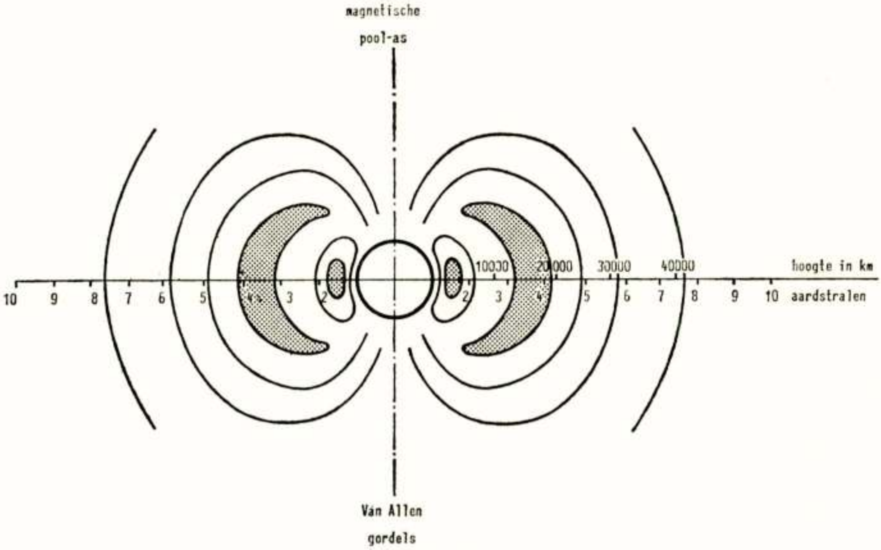


Fig. 5
Van Allen gordels

(fig. 5); de binnenste bevat in hoofdzaak protonen, de buitenste elektronen. Ze zijn als het ware door de aardmagnetische krachtlijnen ingevangen, waaromheen ze een soort spiraliserende heen en weer gaande beweging maken.

Deze gordels zijn van belang voor telecommunicatiesatellieten, omdat ze een nadelige invloed uitoefenen op de zonnecellen die zonne-energie omzetten in elektrische energie voor de voeding van de apparatuur in de satelliet. Ze moeten hiertegen met een speciale afschermende laag worden beveiligd.

6. Verband tussen uitgezonden en ontvangen vermogen

Zowel bij zenden als bij ontvangen zal men zoveel mogelijk gebruik maken van gerichte antennes. Deze geven een zekere vermogenswinst ten opzichte van een isotrope, d.i. een (hypothetische) alzijdige straler.

We noemen:

G = antennewinst ten opzichte van isotrope straler
A = effectieve antenne-oppervlak
Θ = bundelbreedte (3 dB punten)
λ = golflengte
f = frequentie
W_z = uitgezonden vermogen
W_o = ontvangen vermogen
d = afstand tussen satelliet en grondstation

Er is verband tussen de antennewinst G en het effectieve antenneoppervlak A, nl $G = \frac{4\pi A}{\lambda^2}$ .... (1)

We zien dat indien de afmetingen van de antenne evenredig zijn met λ, zodat $A :: \lambda^2$, de antennewinst G constant is.

Voor een paraboolantenne is het effectieve antenneoppervlak ongeveer 60% van het oppervlak van het cirkelvormig voorvlak.

Verder is $\Theta^2 \approx \frac{27.000}{G} = \frac{a}{G}$ ...(2)

Het verband tussen ontvangen en uitgezonden vermogen van een grondstation en een satelliet is

$$W_o = \frac{W_z}{4\pi d^2} G_z A_o \qquad (3)$$

Voor een verbinding tussen twee grondstations via een passieve bolvormige satelliet vinden we

$$W_o = \frac{W_z G_z}{4\pi d^2} \frac{\sigma A_s}{4\pi d^2} A_o$$

$$W_o = \frac{W_z G_z A_o}{16\pi^2 d^4} \sigma A_s \qquad (4)$$

A_s = oppervlak van de grootcirkeldoorsnede van de satelliet
σ = reflectie coëfficiënt van het satellietoppervlak.

We zien dat het ontvangen vermogen afneemt met de vierde macht van de afstand. Dit is het grootste bezwaar tegen het gebruik van passieve satellieten.

Uit (1), (2) en (3) volgt:

$$W_o = \frac{W_z}{4\pi d^2} \frac{a A_o}{\Theta_z^2}$$

Zorgen we er voor dat de antenne van de satelliet een openingshoek heeft die bij de gegeven satelliethoogte juist het gehele zichtbare aardoppervlak bestrijkt dan is $\Theta :: \frac{1}{d}$ ($d > 6000$ km), waardoor W_o bij benadering onafhankelijk van de afstand wordt.

Uit (1) en (2) volgt verder

$$W_o = \frac{W_z A_z A_o}{d^2 \lambda^2} \qquad (5)$$

$$\text{en} \quad W_o = \frac{W_z G_z G_o \lambda^2}{16 \pi^2 d^2} \qquad (6)$$

Uit (5) volgt dat bij gelijkblijvend effectief antenne-oppervlak van zender en ontvanger W_o evenredig is met f^2, terwijl (6) aangeeft dat bij gelijkblijvende antennewinst W_o omgekeerd evenredig is met f^2.

7. Frequentiekeuze

Voor het "gewone" radioverkeer hebben we de keus uit de frequentieband tussen ca. 10 *kHz* en 20 *GHz*. Ten aanzien van de voortplantingsmogelijkheden kan deze band ruwweg in drie gebieden worden gesplitst (fig. 6), n.l.

1. 10 *kHz* – 1000 *kHz* ; voornamelijk voortplanting via de oppervlakte-golf
2. 1000 *kHz* – 30 *MHz*; voornamelijk voortplanting via terugkaatsing tegen de ionosfeer
3. 30 *MHz* – 20 *GHz* ; voornamelijk rechtlijnige voortplanting (verbinding tot „zicht"-afstand)

Fig 7 geeft een beeld van de doorlaatbaarheid van de atmosfeer en de ionosfeer voor invallende straling in het golfgebied vanaf de middengolf omroep tot in de harde *X*-stralen. [1])

Voor satellietverkeer moet de frequentie binnen het "radiovenster" liggen, dus minstens zo hoog zijn dat hij de ionosfeer doorboort, d.w.z. hoger dan ca. 50 *MHz*. We willen voorts een groot aantal kanalen gelijktijdig overbrengen, we hebben daarvoor een brede frequentieband nodig en moeten dus een hoge frequentie kiezen. Omdat het vermogen van de zender in de satelliet beperkt is (thans ca. 5 à 10 W) voornamelijk door het

[1]) John D. Kraus, Recent advances in radio astronomy IEEE Spectrum, September 1964.

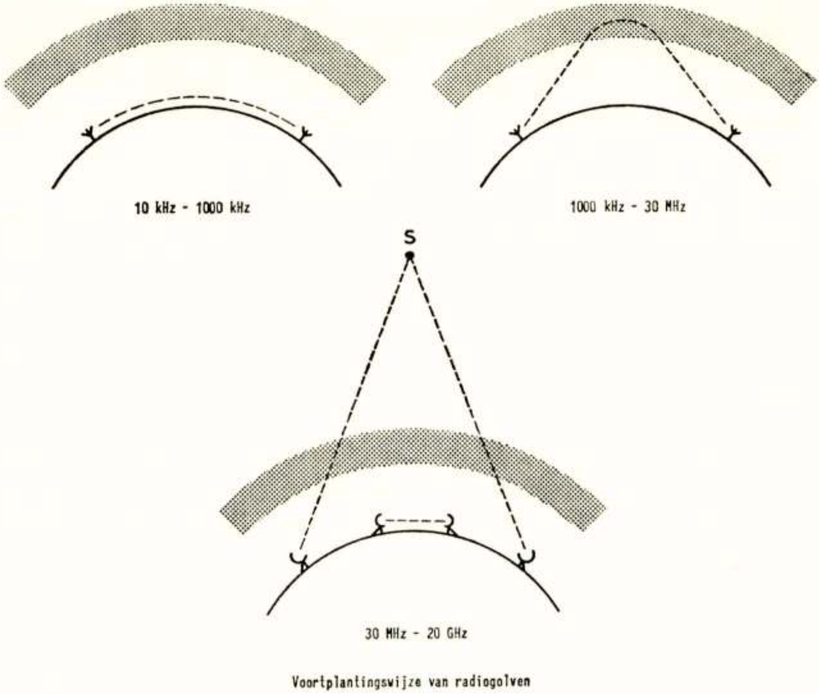


Fig. 6
Voortplantingswijzen van radiogolven in het frequentiegebied van
10 *kHz* - 20 *GHz*

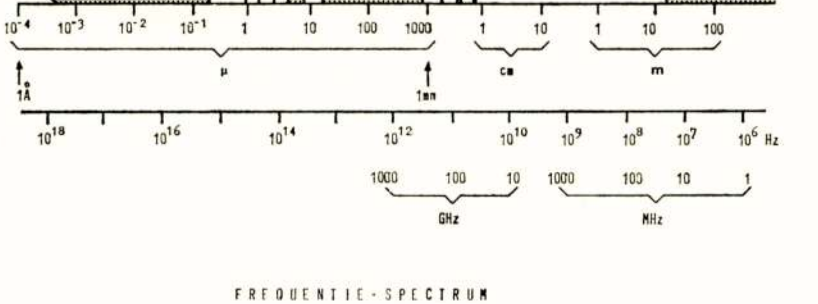


Fig. 7
Doorlaatbaarheid van de atmosfeer voor elektromagnetische straling;
„optische- en radiovensters"

beperkte vermogen dat de voedingsbron (zonnecellen) kan leveren, is de verbinding van de satelliet naar het grondstation de zwakste schakel. Het in het grondstation ontvangen signaal is bijzonder zwak; we moeten dus een frequentiegebied zoeken waarbij de ruisstoringen en de absorptie zo gering mogelijk zijn. In fig. 8 is zowel het verloop van de ruis als van de absorptie als functie van de frequentie aangegeven. Als maatstaf is de ruistemperatuur genomen. Een ontvanger waarvan de antenne met een gerichte bundel gericht is op een omgeving met een absolute temperatuur van $T\,°K$ ontvangt een hoeveelheid ruisvermogen, van thermodynamische oorsprong, evenredig met kTB (k is de constante van Boltzmann = $1{,}38 \,.\, 10^{-23}$ $W/°K/Hz$; B = bandbreedte). Is de antenne naar de aarde gericht dan is $T \approx 300\,°K$.

Wordt de antenne opwaarts naar de hemel gericht dàn treedt snel een aanzienlijke daling van de ruistemperatuur op. De nog aanwezige ruis is afkomstig van een groot aantal astronomische ruisbronnen of radiosterren. Deze ruis neemt met toenemende frequentie af. Bij nog hoger wordende frequentie treedt demping op wegens absorptie, o.m. door de waterdamp in de atmosfeer, hetgeen zich als een verhoging van de ruistemperatuur voordoet. De grootte van deze ruis is afhankelijk van de hoek die de antennebundel met de horizon maakt. Bij een kleine opstraalhoek

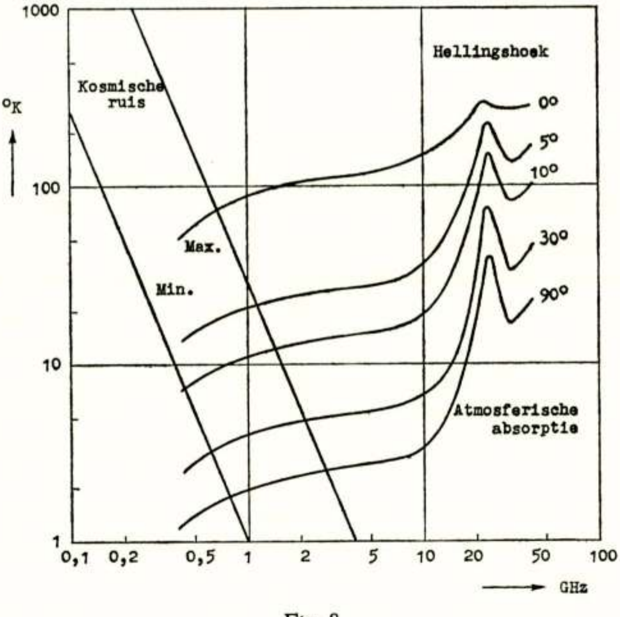


Fig. 8

Kosmische ruis en absorptie van electromagnetische straling in de atmosfeer

is de ruis hoger omdat de atmosfeerlaag in die richting dikker is. Dit is de reden waarom men als regel een minimum opstraalhoek voor de antenne van 5 à 7 graden in acht neemt. Uit de figuur blijkt dat het frequentiegebied van ca. 2 – 10 *GHz* het gunstigste is. Internationaal is overeengekomen voor radioverkeer via satellieten o.m. de frequentieband rond de 4 *GHz* en de 6 *GHz* te gebruiken. Dezelfde frequentiebanden worden gebruikt voor straalverbindingen. Er zijn een aantal regels opgesteld teneinde te voorkomen dat beide systemen elkaar storen.

8. Enkele in studie zijnde systemen

Zowel in Europa als in de Verenigde Staten zijn meerdere systemen in bijzonderheden uitgewerkt. Enkele hiervan zullen in het kort worden beschreven.

a. De Engelse Post Office heeft een wereldomvattend systeem uitgewerkt dat in de eerste plaats bestemd is voor het verkeer tussen Europa en het Gemene Best; het kan evenwel ook dienst doen in het verkeer met en tussen USA, Z-Amerika en Japan.

Het is een actief, plaatsgebonden, standhoudend systeem. Het systeem is meervoudig toegankelijk, d.w.z. dezelfde satelliet kan met meerdere grondstations gelijktijdig werken. Hiertoe heeft men de beschikking over 10 banden, elk met 120 kanalen (enkelvoudig, dus 60 verbindingen). Deze groepen van 120 kanalen zijn over een aantal grondstations verdeeld. Elke band wordt als frequentiegemoduleerd signaal uitgezonden binnen een bandbreedte van ca. 3 MHz. Deze banden liggen ongeveer 5 MHz uit elkaar. De totale bandbreedte is 50 MHz. In de satelliet worden de verschillende banden na transformatie in een *mf*-band van 70 — 120 MHz gedemoduleerd naar de basisband van 60 — 512 kHz. De verschillende basisbanden worden daarna onderling gestapeld in de band van 60 — 5460 kHz, waarna het geheel in één frequentiegemoduleerd signaal door de satelliet wordt uitgezonden met een bandbreedte van 50 MHz. Uitzending van een TV-kanaal met 30 MHz bandbreedte is gelijktijdig mogelijk.

Men onderscheidt twee fasen in de ontwikkeling:

fase 1: 16 satellieten op 10300 km hoogte; $T = 6$ uur (subsynchroon 8 uur); 2×600 kanalen + 1 *TV*

fase 2: 12 satellieten op 14000 km hoogte; $T = 8$ uur (subsynchroon 12 uur) (2×600) kanalen + 2 *TV*

Zender grondstation: 500 *W* per 120 kanalen.

Zender satelliet: 3 *W*, totaal 1200 kanalen.

Latere studies in Engeland uitgevoerd hebben aangetoond dat er gunstiger configuraties voor subsynchrone banen zijn.

b. In opdracht van de Comsat (Communications satellite corporation) zijn door verschillende firma's in de Verenigde Staten een aantal systemen bestudeerd. Tot de belangrijkste studies behoren:

1. willekeurig verdeeld systeem, met 24 satellieten in een polaire baan op ca. 11.000 km hoogte. De satellieten worden in groepen van 6 tegelijk met één Atlas Agena raket in hun baan gebracht.

   Totaal dus 4 schoten. Indien satellieten uitvallen wordt gewacht totdat er nog 18 in bedrijf zijn, waarna met één raket opnieuw 6 satellieten in dezelfde polaire baan worden gebracht. Gemiddeld zijn er dus 21 satellieten in bedrijf.

   Elke satelliet bevat 2 versterkers met een vermogen van 4 W; totaal 260 verbindingen. Geschatte levensduur 10 jaar.
2. plaatsgebonden systeem, met 2 hellende banen onder 60°, op 14.000 km hoogte elk met 6 satellieten.
3. plaatsgebonden systeem, met 2 polaire banen op 11.000 km hoogte elk met 6 of 8 satellieten. Niet alleen de plaats in de baan, ook de onderlinge fase van de satellieten in beide banen wordt bijgeregeld. Volgens nieuwere opvattingen verwacht men dat bijsturing alleen gedurende de eerste maand noodzakelijk is. De afwijking in de hierna volgende jaren is zo gering dat geen bijsturing meer nodig is.
4. plaatsgebonden systeem in een polaire baan op 14.000 km hoogte met 12 satellieten; geschikt voor 800 à 1200 kanalen; levensduur 3 à 5 jaar.
5. synchroon systeem; een studie omtrent de verbetering van het nu in produktie zijnde type syncom, o.a. uitbreiding tot 600 kanalen.

De Comsat heeft van een groot aantal systemen de mogelijkheden en de bedrijfsomstandigheden op een elektronische rekenmachine nagebootst, zoals

de invloed van het aantal satellieten in een baan;

het aantal banen;

de gevolgen van baanverstoringen en de nodige correcties hierop;
nabootsing van het verkeer in drukke en slappe uren;
de gevolgen van het uitvallen van een satelliet;
de behandeling van het verkeer vòòr en tijdens een voorspelbare onderbreking;
de invloed op de verkeerscapaciteit bij meer dan 2 grondstations.

Een van de belangrijkste vraagstukken is dat van de grootte van de kans op een onderbreking van het verkeer. Bij willekeurig verdeelde systemen is er altijd een zekere kans op een (voorspelbare) onderbreking.

Doordat de satellieten niet alle dezelfde snelheid hebben komen er perioden waarbij enkele satellieten onderling een grote afstand krijgen, waardoor geen enkele der satellieten gelijktijdig door beide grondstations wordt gezien, zodat een verkeersonderbreking optreedt. Dit is het grootste bezwaar dat voor telecommunicatiemaatschappijen aan dit, overigens eenvoudig, systeem is verbonden. Dit systeem zal voor dit doel dan ook weinig toepassing vinden. Voor militaire doeleinden ligt dit anders.

Bij plaatsgebonden systemen treden alleen onderbrekingen op na het uitvallen van de satelliet.

Uit de figuren 9 t/m 15 krijgt men een indruk van deze kans.[1])

De figuren 9 en 10 geven voor een systeem met 21 satellieten die willekeurig over een polaire baan zijn verdeeld, voor een willekeurige maand, het aantal en de duur van de waarschijnlijke verkeersonderbrekingen. Uit een vergelijking van beide figuren blijkt dat voor het veronderstelde systeem de kans op verkeersonderbreking op de verbinding Maine (USA) — Londen kleiner is dan op de verbinding Seattle (USA) — Hawaï.

De figuren 11 t/m 15 hebben betrekking op plaatsgebonden systemen. Hierbij treden alleen storingen op indien één of meer satellieten ten gevolge van een storing uitvallen.

Figuren 11 en 12 geven de verkeersonderbrekingen indien bij een plaatsgebonden systeem bestaande uit 2 banen elk met 6 satellieten die gelijkmatig over hun baan zijn verdeeld, totaal dus 12 satellieten, één satelliet uitvalt. Opvallend is hierbij het regelmatig en periodiek verloop der onderbrekingen. Ook in dit geval is het systeem dusdanig ontworpen dat de verbinding Maine — Londen in de gunstigste positie verkeert.

---

1) Deze gegevens werden door de Comsat ter beschikking gesteld.

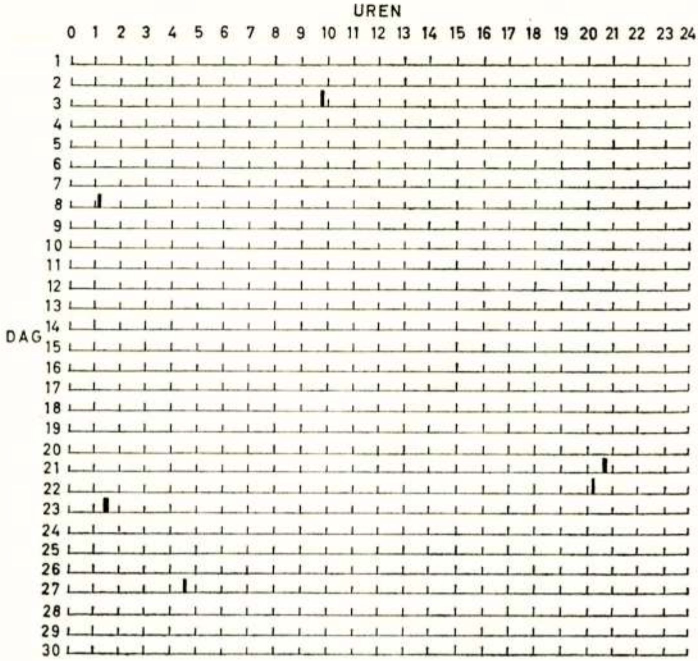


Fig. 9

21 satellieten, random: Maine-Londen

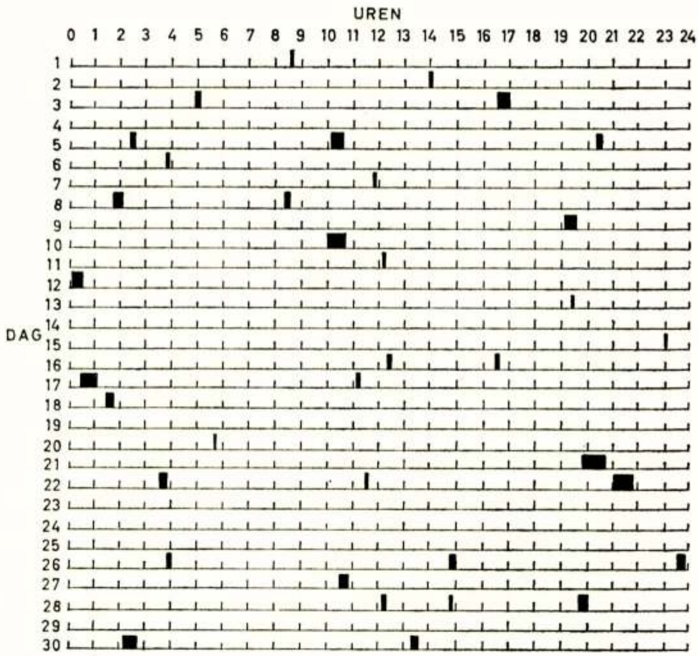


Fig. 10

21 satellieten, random: Seattle-Hawaï

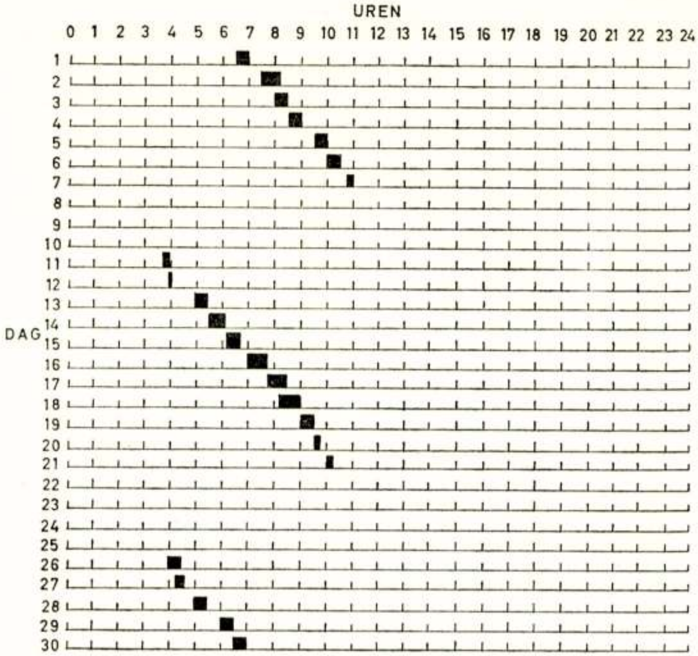


Fig. 11
12 satellieten, no phasing: Maine-Londen

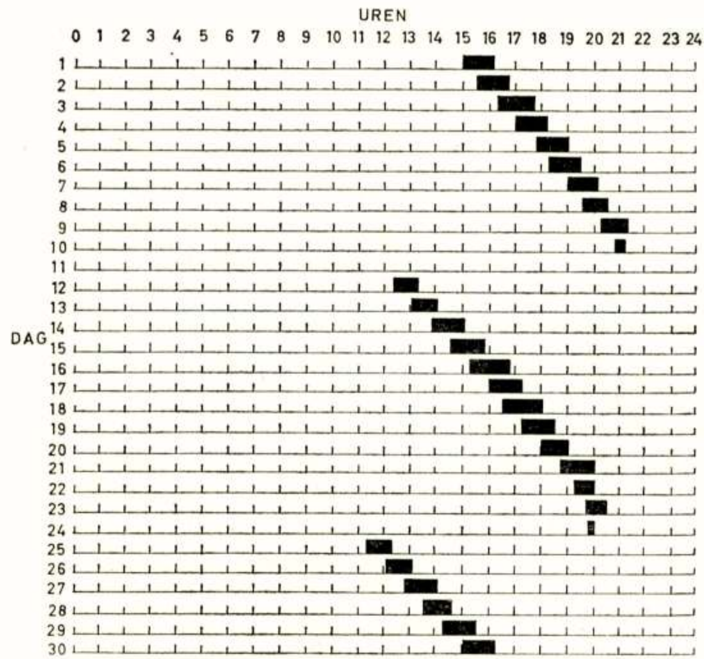


Fig. 12
12 satellieten, no phasing: Seattle-Tokio

De figuren 13 en 14 laten duidelijk zien hoe een gunstig gekozen systeem de kans op verkeersonderbreking op de verbinding Maine — Londen na het uitvallen van één satelliet kan verkleinen tot slechts één korte storing per maand. Het betreft hier een plaatsgebonden systeem, eveneens met 2 banen, waarvan nu ook de onderlinge fase van de satellieten in beide banen constant wordt gehouden.

Tenslotte geeft figuur 15 de verkeersonderbrekingen na het uitvallen van één satelliet in een plaatsgebonden subsynchroon systeem. De onderbrekingen komen nu steeds op hetzelfde ogenblik terug.

c. Als laatste voorbeeld volgt een korte beschrijving van een studie van het Franse instituut voor ruimte-onderzoek, CNES (centre national d'études spaciales). Dit is een plaatsgebonden subsynchroon systeem op een hoogte van 20.400 km; de absolute omlooptijd is hierbij 12 uur, de relatieve omlooptijd ten opzichte van een punt op aarde 24 uur. Het voorgestelde systeem bestaat uit 3 hellende banen elk onder een hoek van 30° met de equator. De banen liggen ten opzichte van elkaar 120° in het equatoriale vlak verschoven. Men bestudeert de gevallen dat elke baan 4 of 5 satellieten bevat (totaal dus 12 of 15 satellieten). Ze kunnen met meervoudige lancering in hun baan gebracht worden, hetgeen het aantal benodigde raketten beperkt, hetgeen een aanzienlijke kostenbesparing geeft omdat een raket belangrijk kostbaarder is dan een satelliet.

De satellieten zijn plaatsgebonden, maar niet regelmatig over hun gehele baan verdeeld; hun onderlinge afstand is 40° respectievelijk 30°. De fase van de satellieten in opvolgende banen is dusdanig gekozen dat de geprojecteerde sporen op aarde van hun satellieten dezelfde zijn. Dit systeem heeft ten opzichte van de andere genoemde systemen het voordeel dat het een grotere bedekking op aarde geeft en dat het de mogelijkheid biedt voor een ononderbroken verbinding in een groot aantal richtingen. Met één ontvanger-zender in elke satelliet kan men $100^0/_0$ van de tijd een verbinding onderhouden over de volgende trajecten.

Europa — USA	(Pleumeur Bodou — Andover)
„ — Afrika	(„ „ — Abidjan)
„ — India	(„ „ — Bombay)

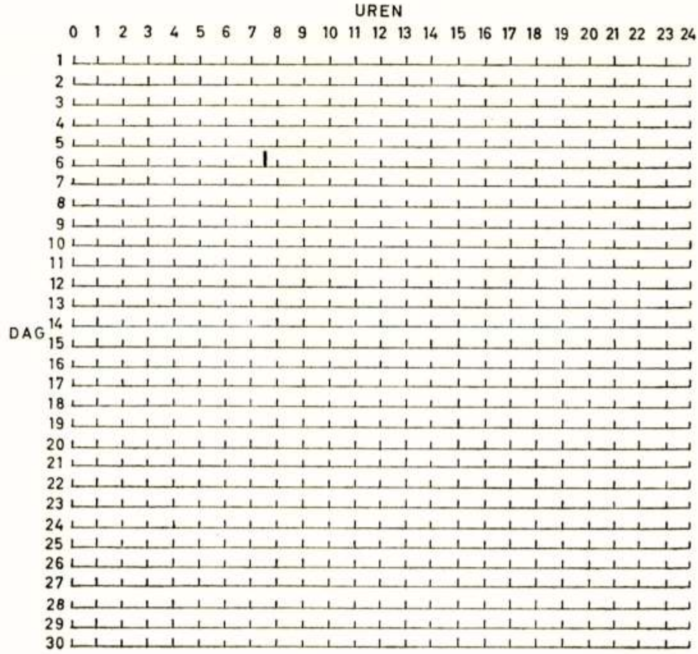


Fig. 13
12 satellieten, phased: Maine-Londen

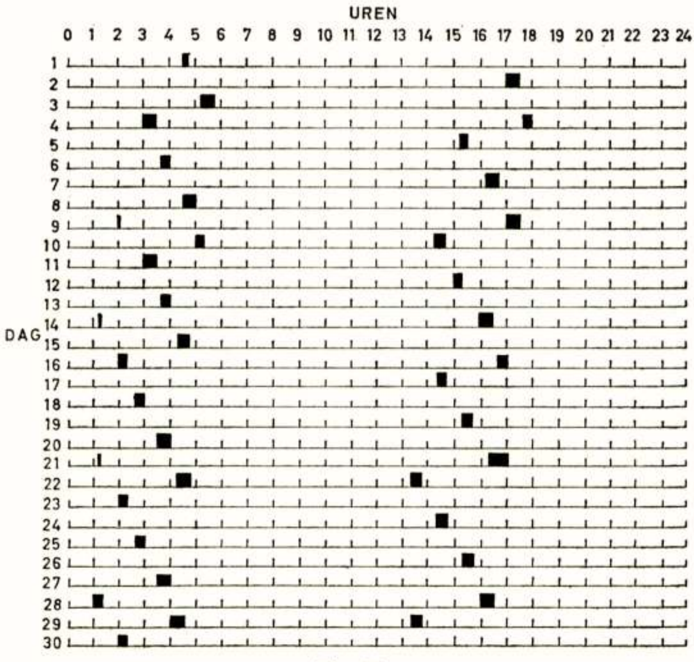


Fig. 14
12 satellieten, phased: Seattle-Hawaï

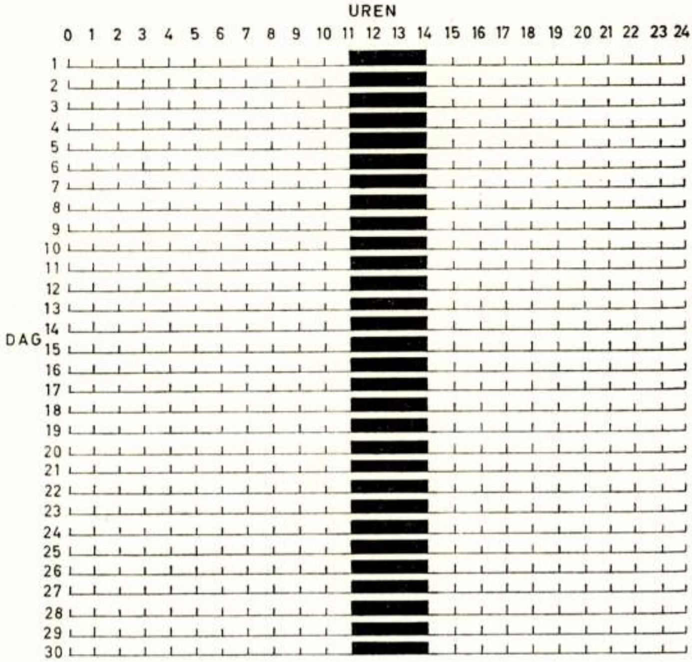


Fig. 15
Subsynchroon satellietsysteem

USA	— Z. Amerika	(Andover	—	Rio de Janeiro)	
,,	— Verre Oosten	(Portland	—	Ibaraki, Tokio)	
India	— ,, ,,	(Bombay	—	,, ,,)	
,,	— Australië	(,,	—	Sidney)	

Dezelfde satelliet (uitgerust met één ontvanger-zender) kan achtereenvolgens voor 2 verschillende verbindingen dienst doen, b.v. eerst USA (Andover) — Europa en later Verre Oosten — USA (Portland). Zijn de satellieten uitgerust met 2 ontvanger-zenders dan neemt het aantal trajecten waarover een ononderbroken verbinding mogelijk is toe. Het systeem vereist evenwel voor het in stand houden van een ononderbroken verbinding, evenals alle andere niet-synchrone systemen, grondstations uitgerust met minstens 2 volledig en alzijdig beweegbare en bestuurde antennes, elk met zender, ontvanger en hulpapparatuur.

9. **De synchrone satelliet HS 303: "Early Bird"**

Deze synchrone satelliet zal begin maart 1965 gelanceerd worden in een equatoriale synchrone baan en geplaatst worden op ca. 30° W.L. Men beschikt nog niet over een lanceerbasis

op de equator gelegen. Dit maakt het moeilijk een satelliet in een vrijwel zuivere equatoriale baan te brengen. Men verwacht daarom dat de satellietbaan ca. 10° van het equatoriale vlak kan afwijken. Dit betekent dat de antenne toch nog bijgestuurd moet worden. [1])

De apparatuur in de satelliet is geschikt voor 240 telefoniekanalen of één TV-kanaal, evenwel zonder geluidskanaal, dat op andere wijze moet worden overgebracht. Na een korte proefperiode zal hij voor betaald commercieel verkeer in dienst worden gesteld. Een van de belangrijkste gegevens die men met de in bedrijfstelling van deze synchrone satelliet hoopt te verkrijgen is een antwoord op de vraag omtrent de al dan niet toelaatbaarheid van de tijdvertraging, die op een enkel traject ca. 250 milliseconden zal zijn. Hierbij komt dan nog de vertraging die de landverbindingen geven. Een antwoord of een tegenwerping wordt dus eerst meer dan een halve seconde later gehoord. Deze vertraging is veel groter dan tot nu toe internationaal is toegestaan; zeer goede echo-onderdrukkers zijn noodzakelijk.

De telecommunicatie-apparatuur in de satelliet is feitelijk een relaisstation. Vanaf de aarde wordt aan weerszijden gezonden in de 6000 MHz-band. De in de satelliet ontvangen signalen worden in frequentie verschoven naar de 4000 MHz-band en na versterking opnieuw uitgezonden.

De eindtrap van de zender bevat twee lopende-golfbuizen, waarvan één in bedrijf staat en de andere als reserve dient; omschakeling geschiedt door een vanaf een grondstation gegeven bevel. Het totale maximale uitgangsvermogen van deze buis is 6 W. Fig. 16 geeft een vereenvoudigd blokschema.[2]) De satelliet bevat ook nog twee telemetriezenders in de 136 MHz-band. Deze signalen worden gelijktijdig met gering vermogen ook in de 4000 MHz-band uitgezonden. De telemetriesignalen zenden gegevens naar de aarde, o.m. omtrent de grootte van de door de zonnecellen opgewekte spanning, de grootte van de batterijspanning, de temperatuur in de satelliet, de stand van de satelliet ten opzichte van de zon, de druk in de cilinders die

[1]) De lancering heeft inmiddels op 6 april 1965 plaatsgevonden vanaf de lanceerbasis Cape Kennedy. Alhoewel deze basis niet op de equator ligt is het niettemin gelukt deze satelliet met een afwijking van minder dan 0,5° in een zuiver equatoriale baan te brengen. Dit is een opvallend resultaat.

[2]) Naar gegevens uit een beschrijving van Hughes Aircraft Company.

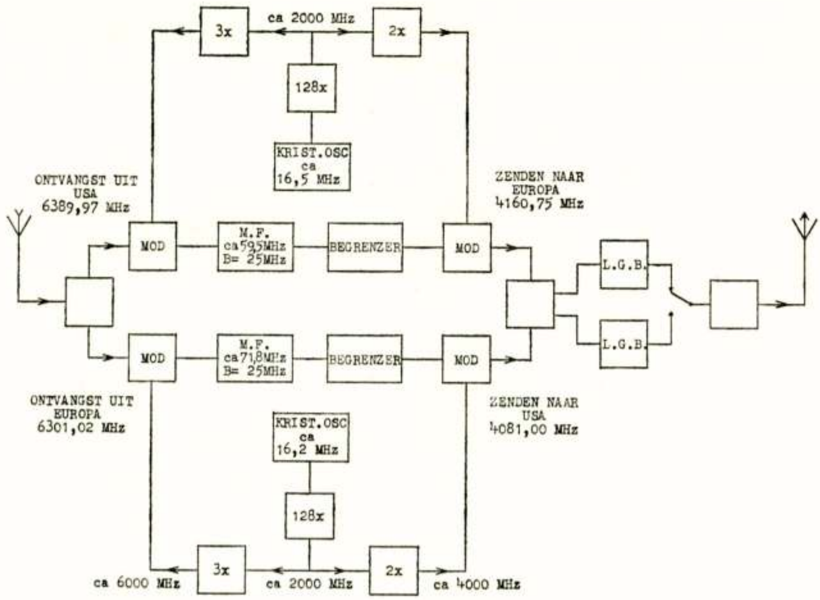


Fig. 16
Vereenvoudigd blokschema van de synchrone satelliet HS 303 „Early Bird"

H_2 O_2 bevatten, waarmede de satelliet zo nodig via kleine straalpijpjes kan worden bijgestuurd.

De ontvanger op 6000 MHz staat ononderbroken ingeschakeld, via deze ontvanger kunnen vanaf de aarde tevens bevelsignalen worden gegeven, zoals: het in- en uitschakelen van een lopende golfbuis, en van de telemetriezenders op 136 MHz en, wanneer nodig, het bijsturen van de satelliet met behulp van H_2O_2-gasstoten.

De elektrische voedingsenergie wordt verkregen uit zonnecellen, waarop 2 nikkel-cadmium bufferbatterijen zijn aangesloten. Deze batterijen kunnen ten tijde dat de satelliet zich in de aardschaduw bevindt de apparatuur voor de telemetrie en het doorgeven van bevelen voeden.

Teneinde het gewicht van de satelliet te beperken zijn de batterijen niet groot genoeg om gedurende lange eclips-perioden ook de telecommunicatie-apparatuur in bedrijf te houden. Aangezien het hier een proefsatelliet betreft en bovendien deze eclips-perioden voor Europa en het oostelijk deel van de USA in de voornacht en late avonduren vallen wordt deze beperking niet bezwaarlijk gevoeld.

De tijdsduur van een eclips hangt af van de tijd van het jaar; voor een zuiver equatoriale baan is zij maximaal ca. 70 minuten. Dit treedt op omstreeks 21 juni en 21 december. In

het voor- en najaar valt de baan van de satelliet buiten de kegel van de aardschaduw, zie fig. 17.

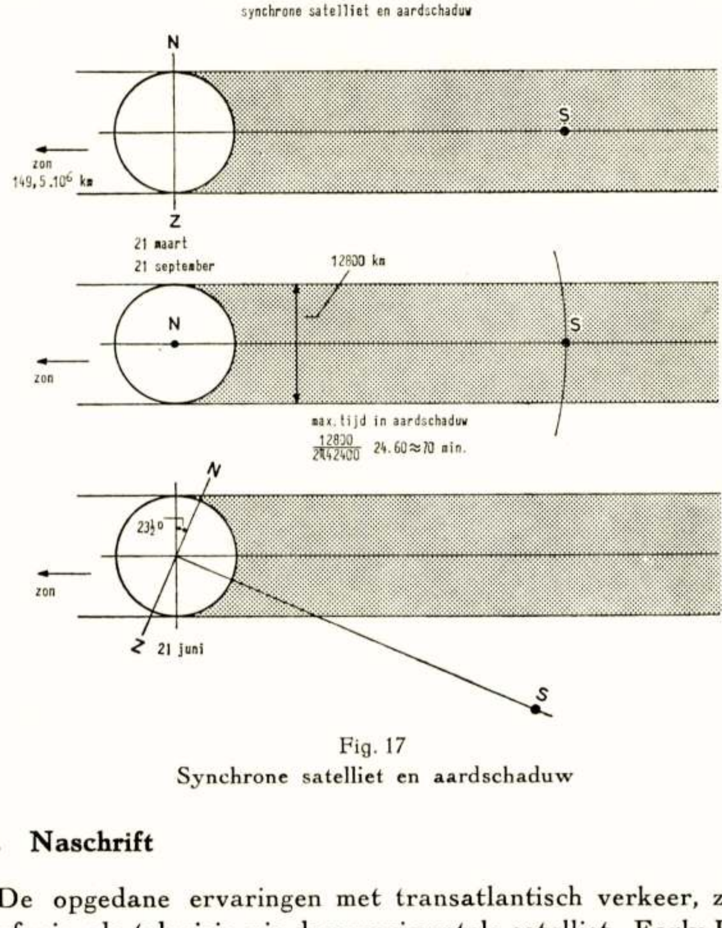


Fig. 17
Synchrone satelliet en aardschaduw

10. Naschrift

De opgedane ervaringen met transatlantisch verkeer, zowel telefonie als televisie, via de experimentele satelliet „Early Bird" gedurende de laatste maanden zijn bemoedigend. Van een aantal TV-uitzendingen hebben vele TV-bezitters zelf kennis kunnen nemen. Hierbij is nog te bedenken dat een rechtstreekse uitwisseling („life") van TV-programma's, tussen Europa en Amerika praktisch uitsluitend via satellieten mogelijk is.

Ongetwijfeld zullen synchrone satellieten in een toekomstig wereld-omvattend telecommunicatiesysteem een belangrijke plaats innemen.

Manuscript ontvangen op 16 februari 1966.

Communicatie als hulpmiddel in de ruimtevaart

door L. R. Bourgonjon *)

Voordracht gehouden voor het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap en de Sectie voor Telecommunicatie-techniek van het K.I.V.I. op 27 januari 1965.

Summary

The radio link plays an important part in space technology, both during launching and in the orbital phase. Three applications are discussed, tracking, command and telemetry.

A long range telemetry system, making use of pulse code modulation, is briefly described.

1. Inleiding

Terwijl enerzijds bij de satelliet-communicatie de mogelijkheden van de ruimtevaart worden toegepast voor het tot stand brengen van lange-afstandsverbindingen tussen vaste stations op aarde, is anderzijds de ruimtevaart ondenkbaar zonder gebruik van de radioverbinding. Hierbij is onder ruimtevaart te verstaan, zowel de lancering als de fase waarbij het ruimtevoertuig in zijn gewenste baan is gebracht.

De radioverbinding wordt daarbij gebruikt voor positiebepaling, commando-overdracht vanuit een grondstation en telemetrie naar een grondstation. We zullen deze drie toepassingsgebieden in het kort bespreken.

2. Positiebepaling

Het is steeds mogelijk bij ontvangst van een signaal de richting van de invallende straling te bepalen. Eén van de nauwkeurigste methoden daarvoor is het gebruik van een interferometer, waarbij het faseverschil wordt gemeten tussen de signalen die worden ontvangen met 2 antennes die op een bekende afstand van elkaar zijn opgesteld. (Fig. 1).

Door gebruik te maken van 2 antenne-paren, die onderling

(* Philips' Telecommunicatie Industrie, Huizen.

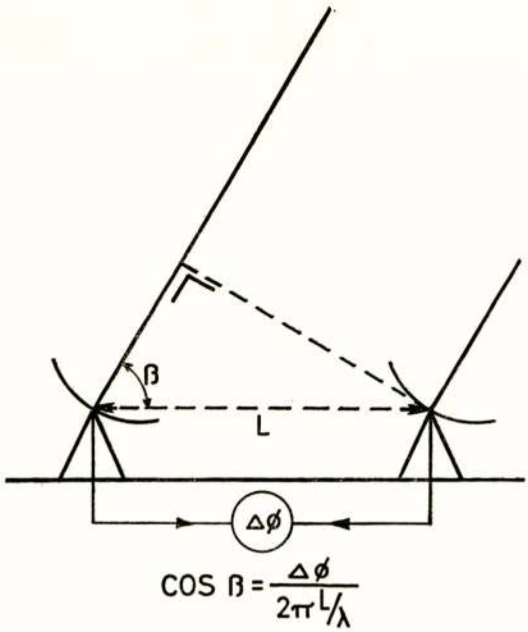


Fig. 1
Positiebepaling met interferometer

loodrecht zijn opgesteld — meestal Noord-Zuid en Oost-West — is het mogelijk de richting van het ontvangen signaal in de ruimte vast te stellen. De hoekmetingen kunnen worden uitgevoerd met een nauwkeurigheid van enkele boogseconden.

Deze methode van richtingsbepaling vindt toepassing in de lanceerfase, indien daarbij van radiogeleiding gebruik wordt gemaakt.

Een dergelijk systeem van radiogeleiding is momenteel in ontwikkeling voor de ELDO-draagraket. Daarbij wordt voortdurend („in real time") de richting van de raket gemeten en uit deze waarnemingen worden, door vergelijking met de bekende waarden in een computer, de benodigde correcties bepaald. Deze correcties worden dan weer naar de draagraket gezonden.

Is een satelliet eenmaal in zijn baan gebracht, dan is het mogelijk door herhaalde hoekmetingen de baanparameters na enige tijd met grote nauwkeurigheid vast te stellen. Voor dit doel zijn op vele plaatsen op aarde stations ingericht, de zogenaamde „minitrack-stations". Ook hierbij wordt het interferometerprincipe toegepast, de gebruikte frequenties liggen in de band van 136-138 MHz.

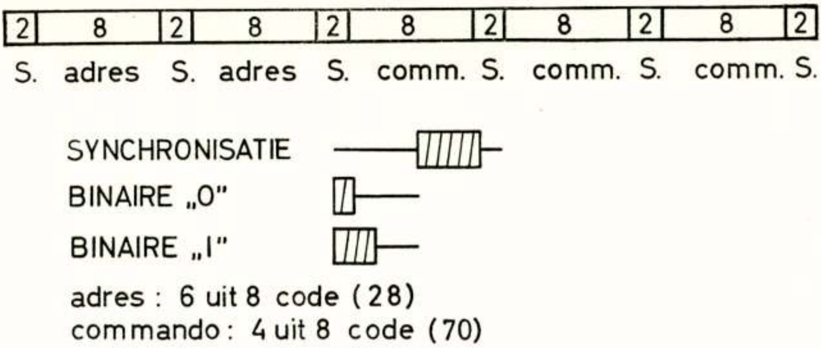


Fig. 2
Digitale toonfrequente commandoverbinding

Voor hoekmetingen is het voldoende indien een ongemoduleerd signaal afkomstig van een eenvoudige zender aan boord van de raket of van de satelliet wordt ontvangen.

Indien behalve hoekmetingen ook afstands- en snelheidsmetingen moeten worden verricht, is het nodig vanaf het grondstation signalen uit te zenden die door een transponder aan boord van het ruimtevoertuig worden teruggezonden. Door modulatie van deze signalen is het mogelijk de looptijd in de transmissieweg en dus de afstand te meten, terwijl uit de frequentie-verschuiving — veroorzaakt door het dopplereffect — de component van de snelheid in de richting van het grondstation is te bepalen. Deze systemen werken meestal op frequenties boven de 1 *GHz* en staan bekend als „range and range-rate systems".

3. Commando-overdracht

Zoals reeds besproken is voor het lanceren met radiogeleiding een commandoverbinding nodig om de berekende correcties in de besturing naar de draagraket te kunnen overbrengen.

Ook met een satelliet is meestal een commandoverbinding noodzakelijk om het meegevoerde instrumentarium en de telemetrie-apparatuur vanaf de grond te kunnen bedienen. Voor deze verbindingen wordt vaak de frequentieband 148-150 MHz gebruikt.

In de Verenigde Staten wordt voor deze commando-verbinding door NASA (National Aeronautics and Space Administration) een systeem gebruikt, waarbij reeksen van toonfrequente

impulsen een binaire code vormen. Een uitgezonden bericht bevat een adres en het eigenlijke commando. Er is een keus uit 28 adressen en 70 commando's.

De ontvangapparatuur in de satelliet reageert alleen op berichten waarin de adrescode van de betreffende satelliet voorkomt. Teneinde te voorkomen dat storingen in de transmissie tot foutieve adressen of commando's aanleiding geven wordt voor beide een beschermde code van 8 bits gebruikt. Bovendien wordt het adres tweemaal en het commando driemaal per bericht uitgezonden. (Fig. 2).

4. Telemetrie

De telemetrie-verbinding is een radioverbinding voor informatieoverdracht van de draagraket of satelliet naar het grondstation. Tijdens het lanceren is deze verbinding noodzakelijk om alle grootheden die bepalend zijn voor het functionneren van de raket te kunnen analyseren. Voor een satelliet is een telemetrie-verbinding nodig om de meetresultaten van het meegevoerde instrumentarium naar de aarde over te brengen, alsmede voor een controle op de bedrijfstoestand van de satelliet zelf.

De telemetrie onderscheidt zich van de hiervoor besproken verbindingen door de meestal veel grotere hoeveelheid informatie die per tijdseenheid moet worden overgebracht, het aantal kanalen bedraagt vaak vele honderden.

In moderne telemetrie-apparatuur wordt meestal PCM (pulscodemodulatie) toegepast. Hierbij worden de over te brengen grootheden na elkaar regelmatig afgetast en de momentele waarden omgezet in een binaire code. Na toevoeging van de benodigde synchronisatiesignalen wordt het resulterende binaire signaal aan de modulator van de zender toegevoerd. Als modulatiemethode wordt zowel frequentie-als fasemodulatie toegepast.

In het ontvangstation wordt de informatie, die na detectie weer in binair-gecodeerde vorm beschikbaar is maar gestoord door ruis, eerst geregenereerd. Daarna is het gebruikelijk de complete informatie vast te leggen op magnetische band voor latere analyse.

Soms wenst men gelijktijdig met bovengenoemde registratie, uit de totale informatie een aantal kanalen direct zichtbaar te maken met een penschrijver of als getal („digital display"). Daartoe moeten de betreffende kanalen dus worden geselecteerd, hetgeen gebeurt in de de commutatie-apparatuur, waarbij de

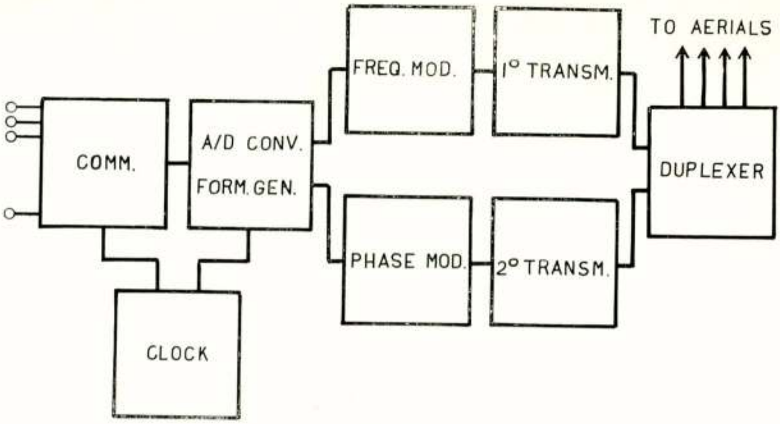


Fig. 3
PCM-telemetrie voertuiguitrusting (blokschema)

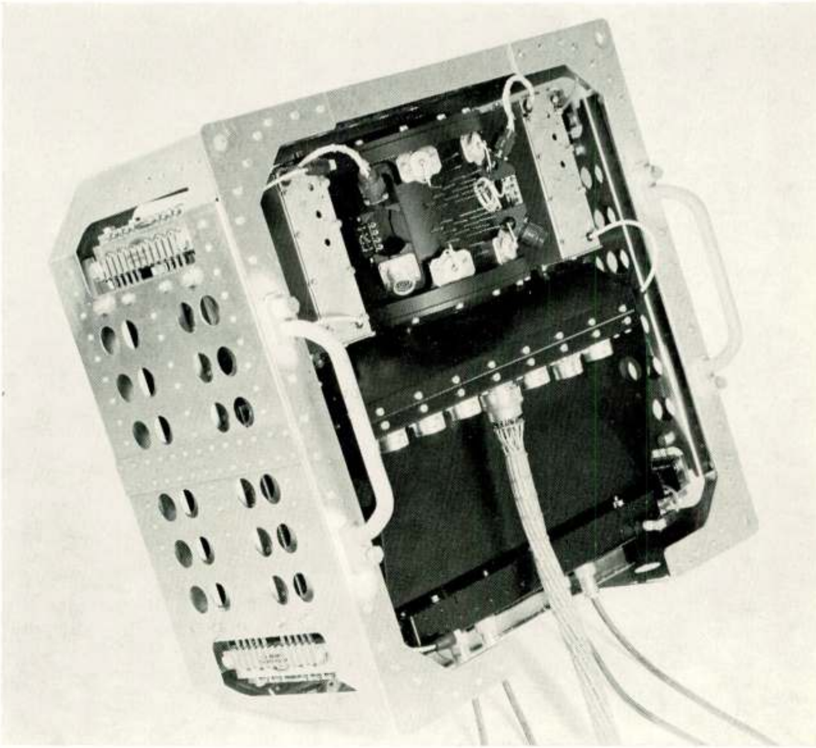


Fig. 4
PCM-telemetrie-apparatuur voor ELDO-draagraket

synchronisatiesignalen nodig zijn. Ook bij latere analyse van de geregistreerde informatie is decommutatie noodzakelijk.

Als voorbeeld van een dergelijk systeem volgen hier enkele bijzonderheden van de telemetrie-apparatuur die momenteel wordt gefabriceerd voor de derde trap van de ELDO-draagraket die vanaf de basis Woomera in Zuid-Australië in een polaire baan zal worden gelanceerd. Fig. 3 is een blokschema van de apparatuur aan boord van de derde trap, fig. 4 geeft een indruk van de uitvoering. Het aantal kanalen is 268, de binaire code bestaat uit 7 bits, waaraan een „parity bit" wordt toegevoegd. De aftastsnelheid van de commutator is 20x per seconde, voor een aantal kanalen is 4x en 16x sub-commutatie toegepast.

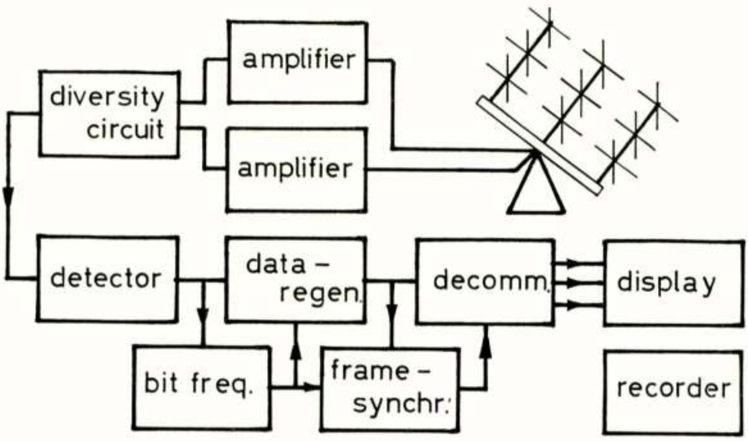


Fig. 5
PCM-telemetrie-grondstation (blokschema)

De resulterende bit-frequentie is ca. 20.000 *Bd*.

Als experiment zijn 2 zenders met ieder 5 W vermogen, op frequenties in de band 136-138 MHz. toegepast. Beide zenders zenden dezelfde informatie uit, één zender met frequentiemodulatie, de andere zender met fasemodulatie.

De apparatuur is volledig getransistoriseerd, waarbij gebruik wordt gemaakt van zowel dunne-filmtechniek als van miniatuurpuntlastechniek.

Voor de ontvangst over het hele traject van de lancering zijn 2 complete grondstations noodzakelijk, opgebouwd zoals aangegeven in het blokschema van fig. 5.

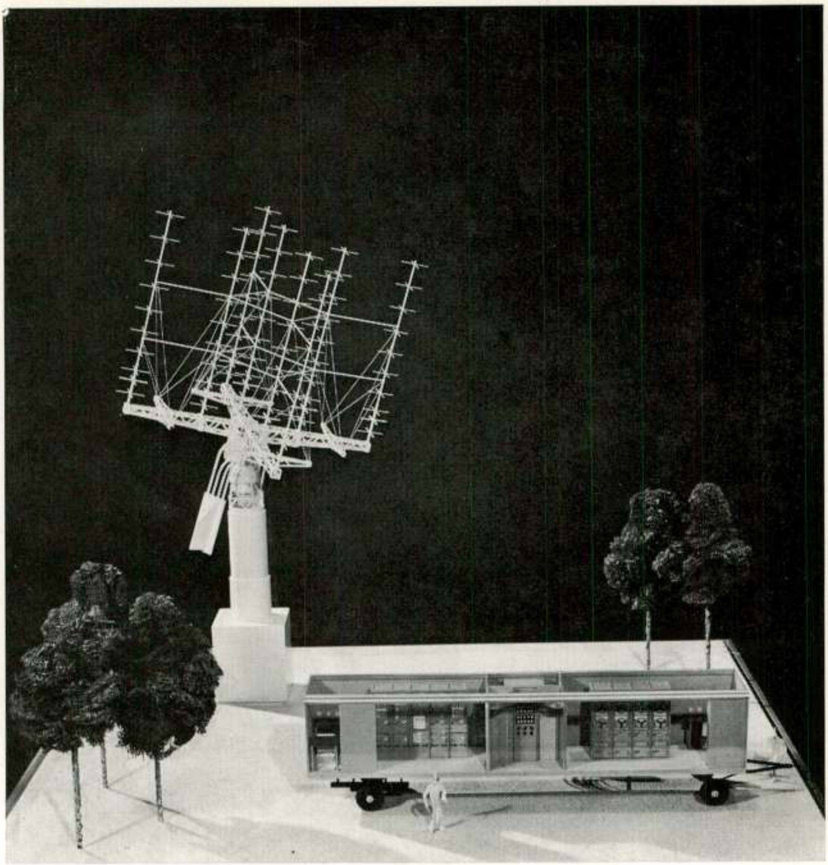


Fig. 6
PCM-grondstation voor ELDO (maquette)

Zoals uit dit blokschema blijkt, wordt polarisatie-diversity toegepast om onder ongunstige omstandigheden een optimale signaal-ruisverhouding te verkrijgen. Fig. 6 geeft een indruk van deze grondstations.

Manuscript ontvangen op 12 april 1965.

„The Goonhilly satellite communication earth-station"

by W. J. Bray *)

Voordracht gehouden voor het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap en de Sectie voor Telecommunicatie-techniek van het K.I.V.I. op 27 januari 1965.

Summary

After an introduction a description is given of the Goonhilly satellite communication earth-station both in its original and new state. The latter concerns the modification of the aerial aiming to improve the figure-of-merit for reception and the gain for transmission in view of the Early Bird-experiments.

1. Introduction

Realizing that the early accumulation of experimental information on the performance of communication satellites and earth stations would be of vital importance for the design of future operational systems, the United Kingdom and U.S.A. Governments prepared and signed in February 1961, a Memorandum of Understanding regarding collaboration between the British Post Office and the United States National Aeronautics and Space Administration (N.A.S.A.) on the testing of experimental satellites to be launched by N.A.S.A.

As part of its contribution to this collaboration the Post Office establised an experimental communication-satellite earth-station on Goonhilly Downs, Cornwall. With the full co-operation of U.K. industry the station was designed, built and brought into operation in a little over twelve months during the period between July 1961 and July 1962, in readiness for the first transmissions made via the Telstar I satellite on 10 July, 1962.

Between July 1962 and September 1964 the station collaborated in many tests and demonstrations, with the Telstar II and Relay I and II satellites, as well as with Telstar I, and much

*) Post-office Research Station, Dollis Hill.

useful experience and knowledge has been gained. The tests, which included transmission of multi-channel telephony with some 600 simulated telephone channels, voice-frequency telegraphy and data signals, as well as monochrome and colour television signals, demonstrated the excellence of the satellite link as a broadband transmission medium. They also demonstrated the validity of the concepts used in the design of the Goonhilly station, in particular the use of a heavy aerial without a radome.

Between September 1964 and April 1965 the aerial and equipment at Goonhilly were removed from service to enable them to be modified to work with the HS 303 („Early Bird") synchronous-orbit satellite, and for carrying up to 240 telephone circuits on a regular commercial basis. The much greater range of the HS 303 satellite, some 36,000 km compared with about 10,000 km maximum for Telstar and Relay, made it necessary to achieve the best possible performance from the aerial and the receiving equipment and to use higher transmitter power.

The Early Bird satellite was launched by N.A.S.A. for the U.S. Communications Satellite Corporation on 6 April, 1965, and since then the Goonhilly station has successfully carried out many transmissions of multi-channel telephony and television, in co-operation with the earth stations at Andover, Maine (U.S.A.), Pleumeur Bodou (France), Raisting (Federal Republic of Germany) and Fucino (Italy).

2. The Goonhilly site

In view of the importance of Transatlantic communication it was decided at the outset that the station should be on the west side of Britain, and for possible operational systems using equatorial orbits it should be well to the south. The primary area of search was therefore the extreme south-west but such considerations as easy road access, power supply availability, and the need to avoid areas of great national beauty restricted the choice considerably. The place selected was on Goonhilly Downs, near the centre of the Lizard Peninsula, Cornwall, see fig. 1, not far from the site at Poldhu where Marconi in 1901 carried out the first transatlantic radio communication tests on long waves.

The site is approximately 0.8 km square, almost flat, and some 100 metres above sea level; it is large enough to accommodate up to five aerials should these ultimately be necessary. The

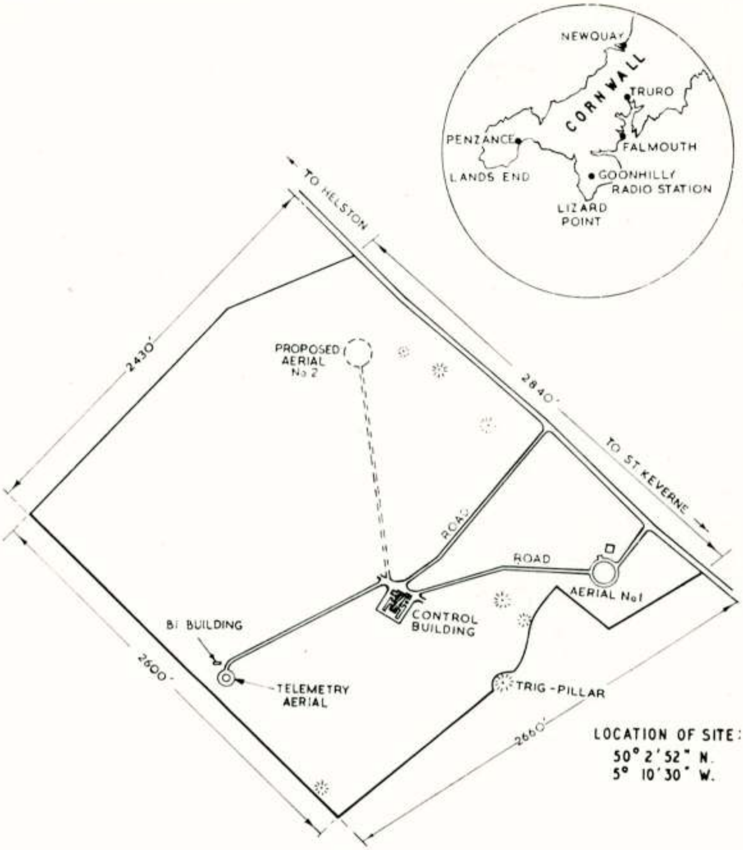


Fig. 1
Goonhilly site

low horizon, some ± 0.5 degree, has enabled useful data to be obtained on propagation from satellites at very low angles of elevation.

The station is well removed from possible sources of interference, such as heavy-density microwave links which share the same frequency bands.

The sub-soil is of solid rock, and this enabled a very stable foundation for the aerial to be provided.

The main station building is near the centre of the site and the present aerial is near the south-east corner; preparations are in hand for a second aerial to be located in the north corner.

3. The steerable aerial

The large steerable aerial at Goonhilly, shown in modified form in fig. 2, uses a 26-metre diameter parabolic-dish reflector without a radome, whereas both the American (Andover) and French (Pleumeur Bodou) stations use horn aerials, with pro-

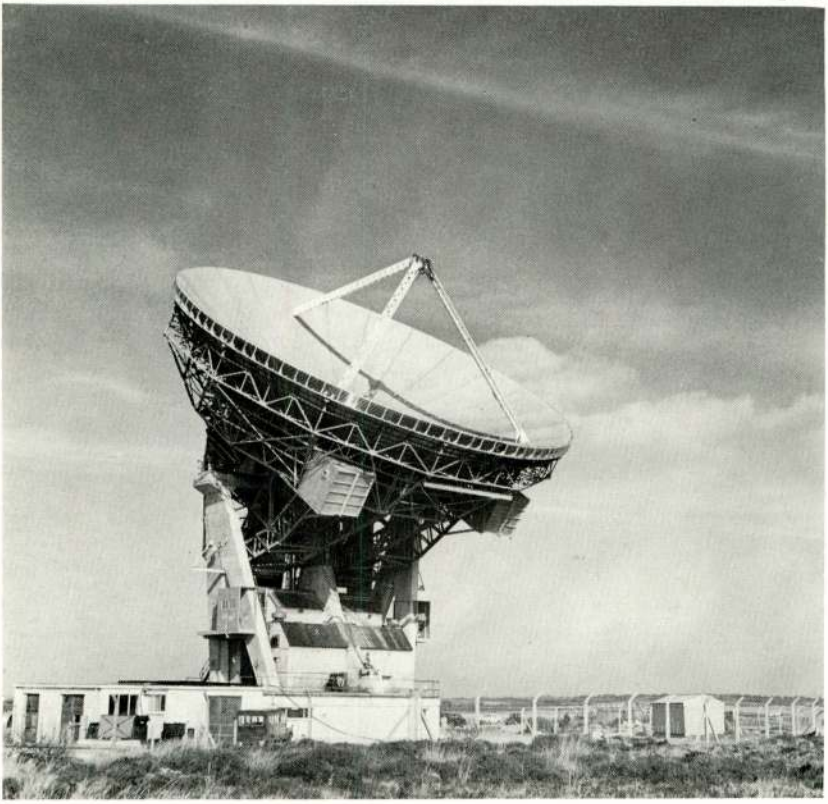


Fig. 2
Goonhilly 26m diameter steerable aerial

tective radomes; the Bundespost parabolic-reflector aerial at Raisting also has a radome. The heavy, sturdy construction of the Goonhilly aerial enables it to be used in wind velocities up to some 60 m.p.h. (average), and the absence of a radome avoids the increase of noise temperature up to some 100° K that may arise when a radome is wet or snow covered. The aerial mount is of the 'azimuth-elevation' type, i.e. with rotation about a vertical axis for azimuth, and tilting about a horizontal axis for elevation.

The framework supporting the reflector is of steel girder construction, and it moves in elevation on four self-aligning roller bearings. These bearings are carried on a horizontal beam of pre-stressed concrete, supported by three concrete portal frames above a massive circular concrete platform. This platform rotates on a 32-metre diameter circular track on taper-roller bearings, the total moving weight being some 10^6 kg.

The dish is balanced by a counter-weight system so that any tendency of the upper and lower edges to droop slightly, as the dish moves from the zenith towards the horizon, is automatically counteracted.

The azimuth drive is via a massive roller chain, whereas the elevation drive uses a split nut moving on a large vertical screw. A Ward-Leonard system using D.C. traction motors of 100 horse-power are used for the azimuth and elevation drives.

The azimuth motion is restricted to $\pm 250°$ from south, an arrangement which makes it possible to avoid the use of slip-rings, all electrical connections being taken through cable loops.

3.1 *Modifications to the Aerial for HS 303*

The modifications to the aerial for working with the HS 303 satellite are shown in fig. 3; these aim at improving the ,figure-of-merit G_r/T, for reception, that is the ratio of the gain G_r to the overall noise temperature T of the receiving system, and increasing the gain G_t for transmission.

Calculations have shown that, for a close approach to the optimum performance, the fine structure profile errors should not exceed about 0.7 mm for spacings less than about a metre; somewhat larger errors, e.g. up to 2 mm, are acceptable provided they are widely spaced. With such errors the estimated loss of gain compared with an ideal reflector is less than 0.3 *db* at 6 *Gc/s*.

To achieve these objectives the modified aerial consists of a central paraboloid 6.3 m in diameter with a solid machined-steel surface, surrounded by 24 adjustable petals, see fig. 3(b). The petals are of pre-formed stainless steel sheets, assembled from panels of about 1 metre side, each petal being supported by a rigid girder structure. The petals are hinged at their inner ends and are adjusted by jacks near their outer ends for conformity with a best-fit paraboloid. An optical system comprising 24 light sources near the petal rim and telescopes mounted on

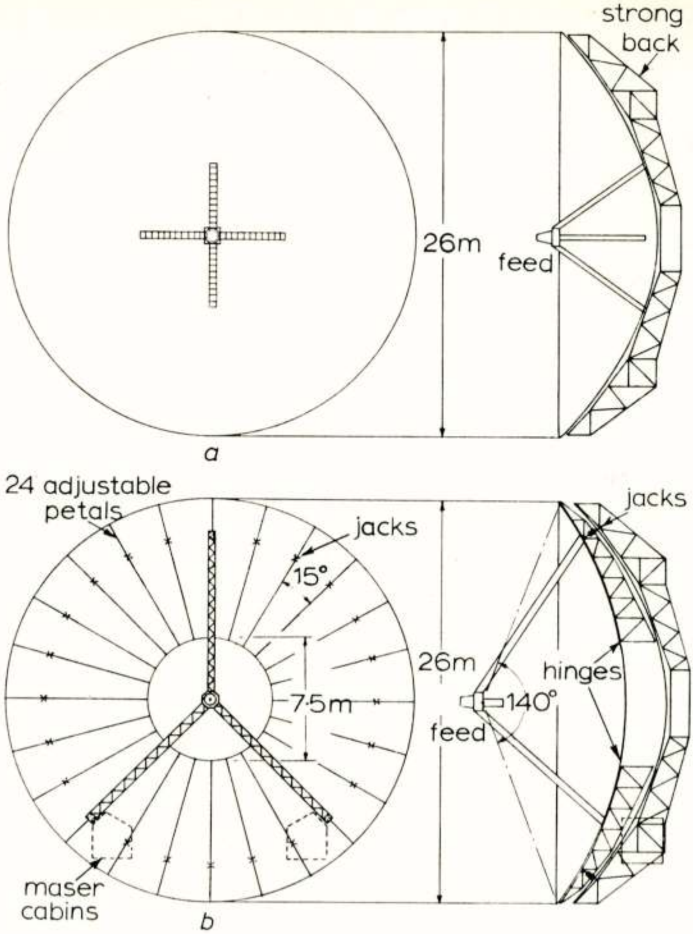


Fig. 3
Goonhilly Aerial No. 1 before (a) and after modification.
(b) Design copyright: Husband and Co

the central paraboloid reference surface is provided for alignment purposes.

It is necessary to minimize blocking of the reflector aperture by the feed support structure, and to reduce noise scattered into the feed from the relatively hot ground. To this end a new feed support structure has been designed, with the feet near to the rim of the reflector. This arrangement avoids shadows which would otherwise be cast by the feed support structure on to the reflector, and the resulting loss of gain. The legs of the supporting structure have been designed for free transmission of waves parallel to the reflector axis.

Finally it can be seen that the focal length has been increased, the reflector rim now subtending an angle of about 140° at the focus. With the particular feed design that has been chosen, this gives a closer approximation to the optimum figure-of-merit and gain than can be obtained with the feed in the plane of the reflector aperture.

The low-noise pre-amplifier (maser) cabin has been relocated near the lower feet of the tripod feed support structure, this appreciably reduces the waveguide losses between the feed and the pre-amplifier, an important factor in achieving a high figure-of-merit.

3.2 *Aerial Primary Feed, Waveguide Feeders and 'Beam-Swinging' Facilities*

The primary feed is a complex unit, as it has to cater not only for transmission of up to ten kilowatts at about 6 *Gc/s* but also simultaneously for reception of signals of less than a micro-microwatt at about 4 *Gc/s*, it is shown in fig. 4. The 6 *Gc/s* transmitted signals are radiated from the open end of an inner circular waveguide, while the 4 *Gc/s* received signal passes through an annular aperture between the inner and outer guides. A large flange just behind the feed aperture assists in controlling the feed radiation pattern and in particular reducing radiation in the rearward direction.

The feed design, in particular the dimensioning of the aperture,

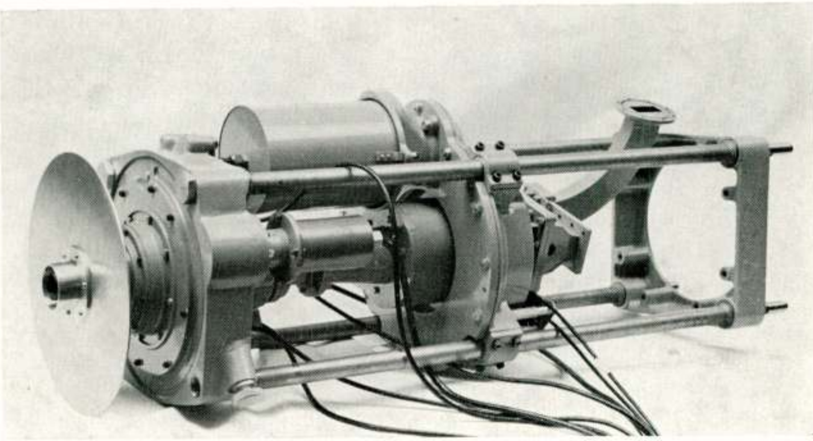


Fig. 4
Aerial primary feed

is such that the reflector illumination efficiency for transmission is about 0.8, i.e. the gain is about 80% of that which would have been produced by a uniformly illuminated reflector (ignoring profile error, aperture blocking and other losses). When the small loss due to conical scanning referred to below is allowed for, the illumination efficiency for reception is about 0.74. These figures compare favourably with a Cassegrain system, since the centre-feed system has less spill-over and aperture blocking than the Cassegrain system; the centre feed arrangement has the additional advantage that it facilitates beam swinging.

Provision has been made for swinging or off-setting the beam by up to 0.5 degree in any direction by displacing the primary feed up to ten centimetres from the mechanical axis of the reflector. This is achieved by fast-acting hydraulic rams, either under the remote control of an operator, or by means of an auto-track system.

The aerial pointing errors are determined by giving the receiving beam a very small conical scan of about one minute of arc. This is done by slightly off-setting from centre the end of the outer circular waveguide, and rotating it by a small hydraulic motor. The speed of scan is about 1000 r.p.m. and is adjustable to avoid harmonics of the satellite spin rate, which would otherwise interfere with the wanted beam-pointing error signal. The resulting amplitude modulation of the satellite 4 *Gc/s* beacon signal can be used to give a visual display on an oscilloscope of the aerial pointing errors, or to provide automatic correction of the aerial pointing, i.e. by movement of the feed as a whole.

The losses in the waveguides connecting the feed to the receiving and transmitting equipment have been reduced by using ,over-moded' waveguides of approximately square section (about 4.5 cm side for transmitting at 6 *Gc/s* and 7.5 cm side for receiving at 4 *Gc/s*). The over-moded waveguide runs are straight to avoid the production of unwanted modes, bends being accommodated by means of raised-cosine taper sections providing transitions between the over-moded guide and normal-size waveguide corners. The overall loss in the receiving waveguide system is about 0.45 *db*, and 1.5 *db* in the case of the transmitting waveguide system.

3.3 *Overall Performance of the Modified Aerial*

The measured gain of the modified aerial, excluding feeder

and component losses, is 58.5 *db* at 4 *Gc/s* and 60.5 *db* at 6 *Gc/s*. The overall noise temperature of the receiving system varies from about 50° *K* at the zenith to 70° *K* at 5° elevation, the figure-of-merit then varying from about 41 *db* to 39.5 *db*. The

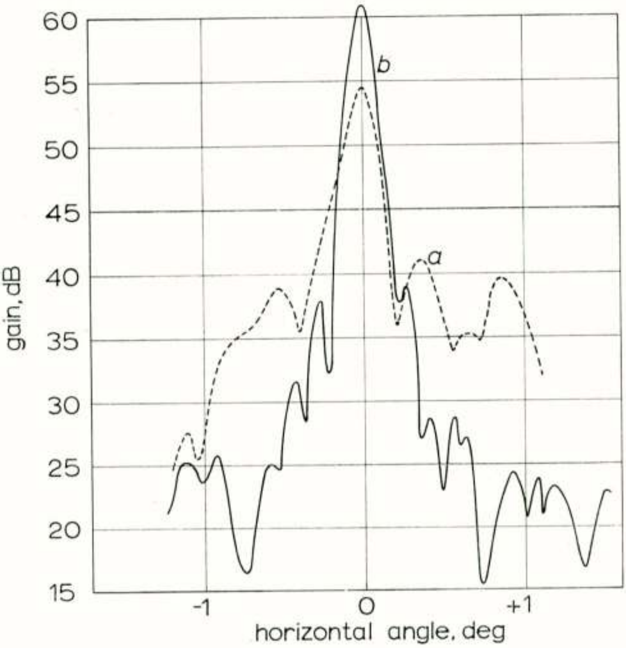


Fig. 5
Goonhilly aerial horizontal radiation diagram (6 Gc/s)

3 *db* beamwidth varies from 11 minutes at 4 *Gc/s* to 7 minutes at 6 *Gc/s*.

The improved reflector profile and other modifications have resulted in a considerable improvement in the aerial radiation diagram, as shown in fig, 5.

3.4 *Aerial Steering*

For operation with the Telstar and Relay satellites the aerial was steered on the basis of predicted orbital data corresponding to the X, Y, Z co-ordinates of the satellite position at 1-minute intervals of time. The predicted data was supplied, up to a week or two in advance, by the Goddard Space Flight Center, U.S.A., via a teleprinter link. At Goonhilly the data was processed in a computer to provide aerial pointing data on punched tape,

giving the angles of azimuth and elevation (corrected for atmospheric refraction), at 1-second intervals of time. Signals derived from the punched tape operated the aerial servo-control system, 16-bit optical shaft encoders being used to determine the actual

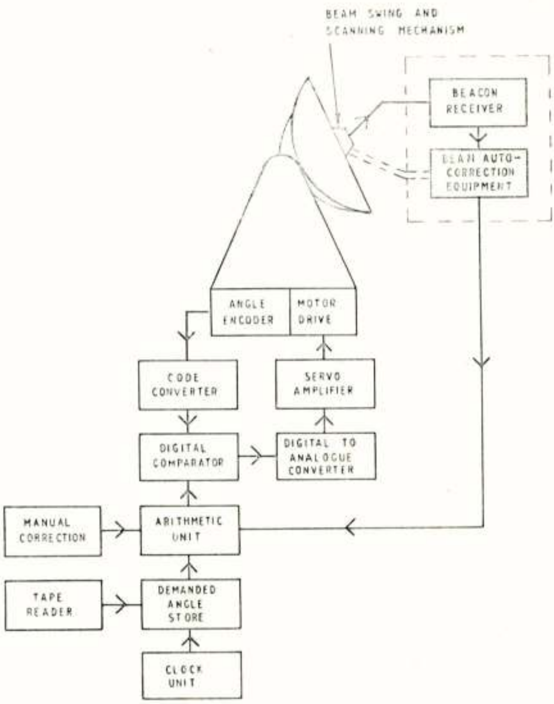


Fig. 6
Schematic of aerial control system

azimuth and elevation angles of the reflector mechanical axis.

In the case of the HS 303 satellite the Communication Satellite Corporation arranged to supply predicted azimuth and elevation pointing data at 10-minute intervals of time, several days in advance. As viewed from Goonhilly the HS 303 orbit consists of a narrow figure-of-eight pattern, traced once every twenty-four hours; in this case the 10-minute data provides sufficient accuracy. However, for aerial control purposes the Goonhilly computer can provide interpolated pointing data at 1-minute intervals of time. Fig. 6 shows in simplified schematic form the aerial control system, including the conical scan and autotrack equipment.

In the event, the plane of the HS 303 orbit approximated

closely to the equatorial plane of the Earth and the daily movement of the earth-station aerial beam was a fraction of one degree, i.e. within the range of the aerial beam-swinging equipment at Goonhilly, the aerial reflector position remaining substantially unchanged.

4. Transmitting and receiving equipment

In the simplified block diagram shown in fig. *7*, it can be seen that the R.F. portions of the transmitting and receiving equipment are located close to the aerial; but all baseband equip-

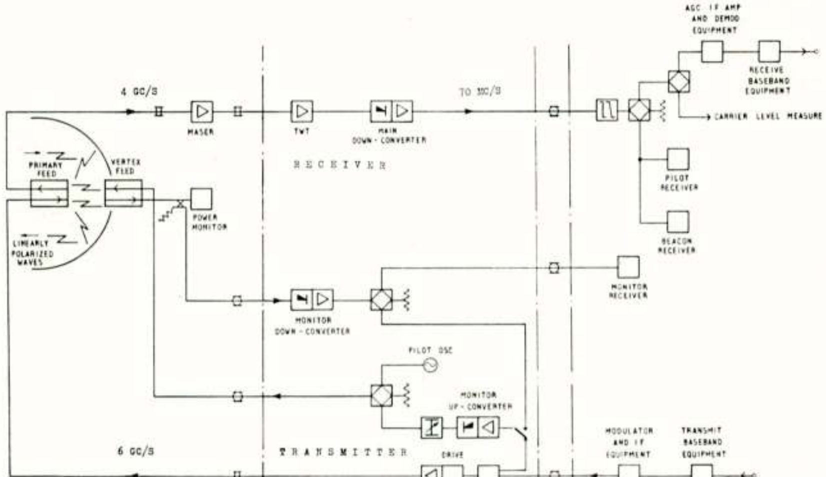


Fig. *7*

Schematic of transmitting and receiving equipment

ment, frequency modulators and demodulators are in the main equipment building some 600 metres away from the aerial. Interconnections between equipment at the aerial and at the main building are over coaxial cables at intermediate frequencies of some $70\ Mc/s$.

The low-noise pre-amplifier used for reception is of the travelling-wave maser type using a ruby crystal and a comb slow-wave structure; it is cooled to about $2^\circ K$ by liquid-helium and liquid-nitrogen, using a 19-litre dewar lasting more than 24 hours between batch fillings. Fig. 8 shows the maser installation at Goonhilly. The magnetic field is provided by a superconducting magnet, thus avoiding the large and heavy permanent

magnet required in earlier designs. The maser, which has a noise temperature of about $10° K$ at the input port, provides a gain of 34 *db* and a bandwidth of 18 *Mc/s*. (Wider bandwidths are available at reduced gain).

The remainder of the R.F. equipment is in a cabin on the turntable where a 6 *Gc/s* transmitter is provided for operation with the Telstar and HS 303 satellites. It uses a water-cooled high-power travelling-wave tube developed in the U.K. by the Services Electronics Research Laboratory and now in commercial production. It provides an output of up to 8 kilowatts with

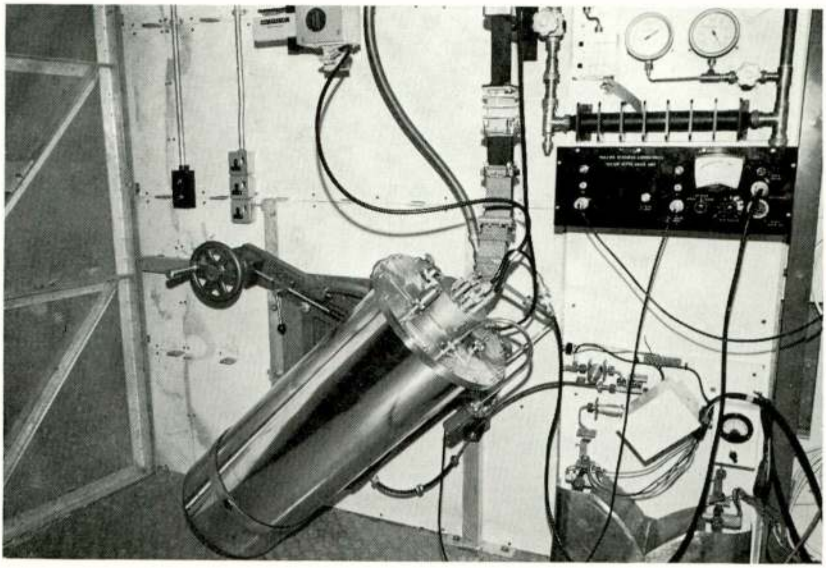


Fig 8
Super-conducting magnet, helium-cooled maser installation at Goonhilly.

a power gain of about 30 *db*, an instantaneous bandwidth in excess of 50 *Mc/s* and an electronic tuning range of some 250 *Mc/s*.

The low-power transmitter drive equipment and much of the intermediate-frequency and baseband equipment is similar to that used in microwave radio-relay systems. An exception is the frequency-modulation feedback demodulator which, by reducing the f.m. signal bandwidth before limiting, improves the carrier-to-noise ratio and thus the receiving system margin above threshold. This is a valuable characteristic in view of the very

low levels of signals received from satellites.

Comprehensive testing facilities are provided, these include:

(a) a 6 *Gc/s* radiometer using a cooled parametric amplifier for measurements of aerial gain at 6 *Gc/s* using the radio star Cassiopeia A;

(b) a noise lamp and liquid-nitrogen cooled matched resistive load providing a $77^\circ K$ standard noise source for measurement of the overall noise temperature of the receiving system;

and

(c) a satellite beacon simulator mounted on a tower some 30 km from Goonhilly, this is used for aerial pointing and other tests.

5. The main equipment building

The main equipment building, fig. 9, provides accommodation for offices, canteen, computer room, teleprinters, aerial control system equipment and other facilities, in addition to the intermediate frequency and baseband communication equipment and



Fig. 9
Goonhilly main equipment building

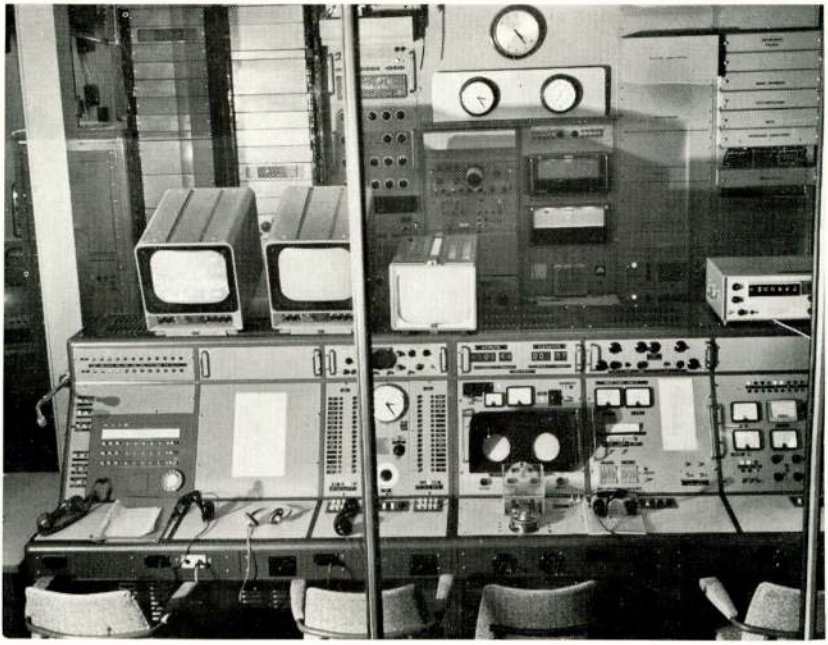


Fig. 10
Goonhilly equipment control console suite

control consoles. The aerial supervisor is located in a glass-walled observation room from which he has an excellent view of the aerial. The lattice tower accommodates aerials for the microwave links which connect Goonhilly to the main broadband network of the U.K., and through that to much of Europe.

Fig. 10 shows the main equipment control console suite. This is the focal point for control of operations at the station, the controller of operations being in communication by telephone and by public address loudspeaker system with staff at various key points. He is also given an indication, by a lamp display, of the condition and readiness for use of the various main items of equipment at all times. It is at this point that the performance of the system as a whole can be monitored and, if necessary, test signals of various kinds, including white-noise signals simulating various numbers of telephone channels and sine-squared pulse and bar television test signals, can be applied.

6. **Conclusions**

With the successful conclusion of the tests and demonstrations

using the Telstar and Relay satellites the preliminary experimental phase of satellite communication development may be considered to have been completed.

The next phase, which will involve regular transatlantic commercial operation with the HS 303 satellite, has now commenced. Although of relatively limited capacity-some 240 telephone channels- and with restricted multiple access facilities, the HS 303 satellite will provide useful experience in the problems of traffic operation via satellite links. In particular it will enable the reaction of subscribers to the one-way transmission delay of some 300 milliseconds inherent in the synchronous orbit to be determined. It is thus an important precursor to the establishment of a global communication-satellite system of larger capacity suitable for use with many earth stations simultaneously.

In these later phases of communication satellite system development. as in the earlier experimental phase, it is hoped that the British Post Office earth-station at Goonhilly Downs will make an effective and useful contribution.

7. Acknowledgements

The writers thanks are due to his colleagues in the Space Communication Systems and Research Branches of the Post Office Engineering Department for their many contributions to the work described above. He also wishes to pay tribute to the contributions made by Husband & Co., the consulting engineers responsible for the mechanical design and construction of the aerial system, to Mullard Research Laboratories, Salfords, Surrey, who designed the low-noise maser amplifier and to the Services Electronic Research Laboratories, Baldock, for their work on the highpower travelling-wave amplifier. Many other contributions, too numerous to mention individually, were made by the U.K. telecommunications industry.

The permission of the Engineer-in-Chief of the Post Office to make use of information contained in this article is gratefully acknowledged.

Manuscript ontvangen op 4 juni 1965.

Die deutsche Satelliten-Erdefunkstelle Raisting

von H. Holzwarth*)

Voordracht gehouden voor het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap en de Sectie voor Telecommunicatie-techniek van het K.I.V.I. op 27 januari 1965.

Summary

After a short review of the history and construction of the Raisting satellite earth station near Munich, built up by order of the German Federal Post Administration (Deutsche Bundespost), the communications facilities are described in detail. Their principal features are:

A parabolic-dish antenna with a diameter of 25 m under an air-supported radome with a Cassegrain reflector and a horn-reflector feed; the antenna system can be oriented in azimuth and elevation by means of hydraulic motors;

Simultaneous use of the antenna for transmission in the 6 Gc band and reception in the 4 Gc band;

The transmitter for frequency modulation including a wideband travelling wave tube amplifier with an output power of 2 kW;

The receiver including a maser preamplifier and a superheterodyne receiver with frequency feedback.

The system includes an antenna steering unit controlled by magnetic tapes, by means of which orbiting satellites can be tracked, and a Vernier Autotrack System (VAS) which makes the antenna automatically track a satellite once „captured".

The antenna gain is 58.5 db at 4 Gc and 61.5 db at 6 Gc; the noise temperature of the complete receiving system is about 30° K with the dish facing the zenith and 50° K at an elevation of 5°. Experimental operation of the station was started in the fall of 1964.

1. Einleitung

Der Keim für die Entstehung der Erdstation Raisting wurde im Jahre 1959 gelegt, als nach den erfolgreichen Versuchen der Bell-Laboratorien mit dem Ballon „Echo" von seiten der ATT Kontakt mit einigen europäischen Postverwaltungen aufgenommen wurde mit dem Ziel, für das bereits geplante Telstar-Projekt

*) Zentrallaboratorium der Siemens-Halske AG., München.

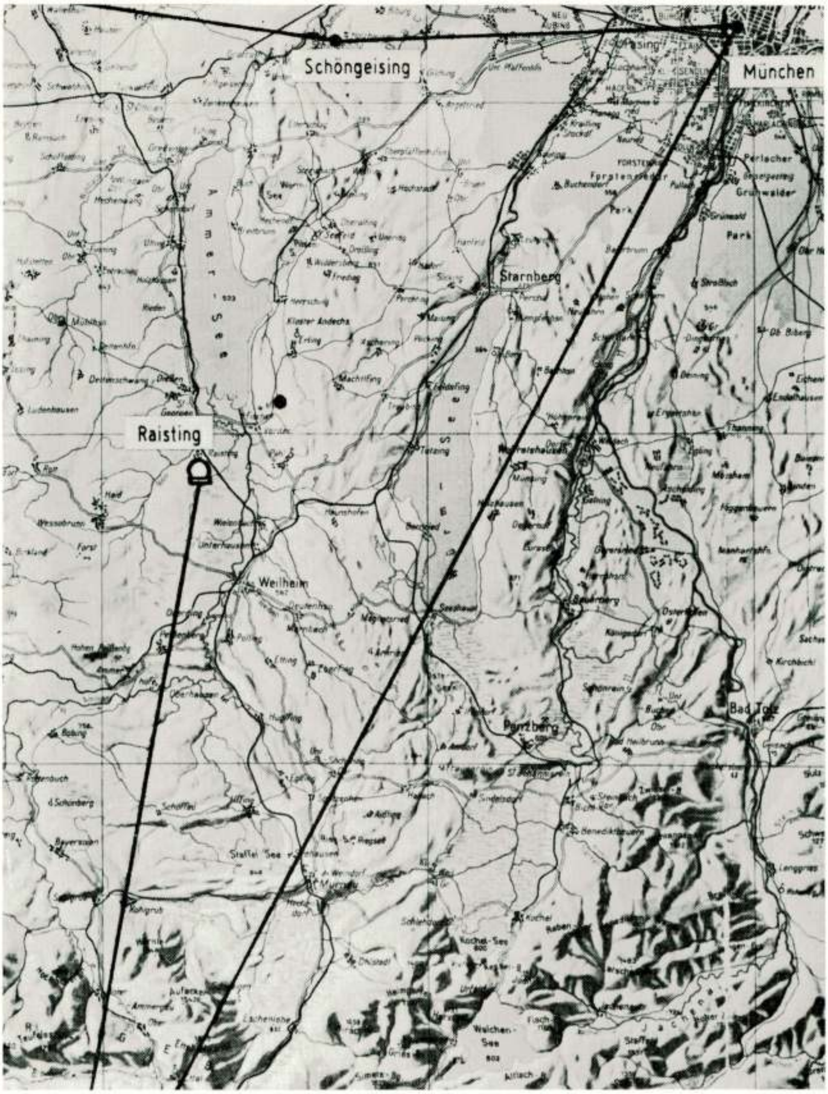


Bild 1
Geographische Lage der Erdefunkstelle Raisting

europäische Partner zu finden. Im Gegensatz zu England und Frankreich, wo man sich verhältnismässig rasch zum Bau von Erdstationen entschloss, stand die Deutsche Bundespost vor beträchtlichen Schwierigkeiten, das Projekt zu finanzieren. Es hatte sich nämlich nach eingehender Prüfung gezeigt, dass selbst bei einfacher Ausführung viele Millionen DM aufgebracht werden müssen. Erst Ende des Jahres 1961 konnte der Startschuss

gegeben werden, so dass Anfang des Jahres 1962 die Arbeiten anlaufen konnten. Mit der Projektleitung wurde die Firma Siemens & Halske AG. betraut. Mit dem Bau konnte jedoch erst im Frühjahr 1963 begonnen werden, da der Ankauf des Grundstückes auf erhebliche Schwierigkeiten stiess. Ein geeignetes Gelände dafür konnte zwar in der sogenannten „Raistinger Wanne" bei München schon nach kurzer Zeit aus einigen möglichen Geländen als günstigstes ausgewählt werden, jedoch verbrauchten die Verhandlungen mit den Grundstückseigentümern kostbare Zeit. Der Standort sollte ja so gewählt sein, dass die Erdstation nicht durch Richtfunkstationen gestört und diese wiederum durch die Erdstation nicht gestört würden; andererseits sollte der Standort eine Reihe weiterer Nebenbedingungen erfüllen, so z.B. bau- und verkehrstechnisch günstig liegen.

Die nachrichtentechnisch günstige Lage geht aus Bild 1 hervor, das die Umgebung des Dorfes Raisting zeigt, welches ca. 5 km südlich des Südzipfels des Ammersees liegt. Am rechten oberen Rand ist in einer Entfernung von 50 km München zu sehen. Nach allen Seiten steigt das Gelände hügelig zu Höhen von 100 bis 200 m über der Station an. Am Südrand bilden die Alpen eine gute Abschirmung. Messungen zeigten, dass die Abschirmwirkung der Höhen besser als 30 dB nach allen Richtungen ist. Andererseits ist der Abschattungswinkel gegen den Horizont nirgendwo grösser als 2°, so dass kein nennenswerter Verlust an Uebertragungszeit bei umlaufenden Satelliten entsteht. Die Nachrichtenübertragung von Raisting nach München läuft über eine Richtfunklinie über die Zugspitze. Die nächstgelegene alte Richtfunkverbindung München-Stuttgart ist oben mit der Zwischenstelle Schöngeising eingezeichnet.

Um einen diskutablen Fertigstellungstermin zu erreichen, war es notwendig, einen Teil der Einrichtungen aus den USA zu beziehen; etwa 25% der für die Anlage aufgewendeten Kosten entfielen auf Lieferungen aus den USA.

2. Uebersicht über den Stationsaufbau

Die erste Aufbauphase der Station, die zunächst nur eine einzige Antennenanlage enthält, wurde Ende des Jahres 1964 abgeschlossen. Die Station ist in zwei Gebäudekomplexen untergebracht; in dem einen befindet sich die Antennenanlage, der andere ist das etwa 300 m entfernte Zentralgebäude, das für

den Anschluss weiterer Antennenanlagen geeignet ist. In ihm sind die Stromversorgungsanlagen, wie Netztransformatoren, Dieselaggregate, Notstrombatterien, die Heizungsanlage, der Ueberwachungs- und Rechnerraum und die Unterkunftsräume für die Bedienungsmannschaften untergebracht.

Wir wollen uns nur näher mit der „Antennenanlage" beschäftigen. Diese besteht im wesentlichen aus drei Komplexen, nämlich der steuerbaren Grossantenne selbst, den nachrichtentechnischen Geräten der Sende- und Empfangsanlage und den Antennensteuergeräten.

Bei Beginn der Projektplanung standen wir vor einem Problem, das auch heute für alle Erdstationen auf der Welt noch nicht eindeutig gelöst ist, nämlich der Frage: Antenne mit oder ohne Radom? Wir entschieden uns für einen luftgestützten Radom.

Die Vorteile sind:

1. Schutz der Antenne vor Witterungseinflüssen (Eis, Schnee, Regen);
2. keine Windbelastung der Antenne, dadurch leichtere Konstruktion möglich;
3. geringe Temperaturschwankungen, da Klimatisierung des Radoms möglich;
4. praktisch keine Korrosion.

Diesen Vorteilen steht der einzige Nachteil einer etwas erhöhten Rauschtemperatur gegenüber; unter normalen Witterungsverhältnissen ist dieser Einfluss jedoch praktisch zu vernachlässigen; nur im Falle von stärkerem Regen macht er sich bemerkbar. Eine freistehende Antenne benötigt demgegenüber, wenn sie unter starken Windbelastungen einwandfrei auf ihr Ziel eingerichtet werden soll, eine schwere kostspielige Konstruktion; es ist fraglich, ob bei Windgeschwindigkeiten von 150 km/h, für die man im allgemeinen Freiluftanlagen dimensionieren muss, eine tragbare konstruktive Lösung überhaupt gefunden werden kann. Das Problem der mechanischen Veränderungen durch ungleichmässige Erwärmung bei Sonneneinstrahlung dürfte ebenfalls schwer zu lösen sein.

Eine Kostenabschätzung ergibt, dass eine freistehende Antenne sicher nicht billiger, wahrscheinlich aber teurer als eine Antenne mit Radom und der zugehörigen Luftstützungsanlage ist. Erwähnt möge hier noch die Frage des Landschaftsschutzes sein.

Wir sind auch heute nach Fertigstellung der Anlage der Meinung, dass unter unseren klimatischen Bedingungen die Radomlösung vorzuziehen ist.

Bild 2 zeigt im Blockschaltbild die wesentlichen Bausteine der Antennenanlage. Die Antenne wird im Frequenzgebiet bei 6 GHz zum Senden und bei 4 GHz zum Empfangen simultan verwendet. Sie wird von hydraulischen Motoren, die von Servoverstärkern gesteuert werden, in Azimut und Elevation angetrieben. Diese werden ihrerseits vom Antennensteuergerät angesteuert. Für beide Bahnrichtungen sind Stellungsanzeiger vorgesehen, die die Iststellung der Antenne in Form pulsförmiger Signale dem Antennensteuergerät zuführen (Datenabnahme). Die Antenne kann nun im Prinzip in zwei Moden nachgeführt werden, nämlich einmal von Magnetbändern aus, auf denen die

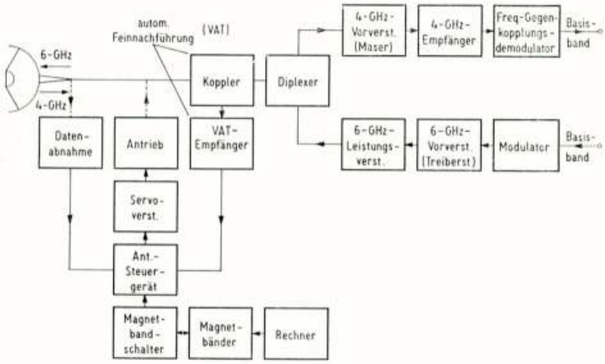


Bild 2

Prinzipschaltbild der deutschen Satelliten-Erdefunkstelle Raisting

Bahndaten der zu verfolgenden Satelliten digital gespeichert sind, oder zum anderen durch die sogenannte automatische Eigennachführung; die Kombination beider Moden ist möglich. Bei der Magnetbandsteuerung werden im Antennensteuergerät die Solldaten des Magnetbandes mit den Istdaten der Datenabnahme verglichen. Bei Abweichungen steuert das Antennensteuergerät die Servoverstärker vorzeichenrichtig an. Für die Eigennachführung (VAT = Vernier Autotrack) wird ein vom Satelliten ausgestrahltes Bakensignal im 4-GHz-Frequenzband im VAT-Koppler ausgekoppelt und im VAT-Empfänger verstärkt und ausgewertet. Hierfür wird die E_{01}-Welle im Rundhohlleiter verwendet, die bei genauer Ausrichtung der Antenne nicht angeregt wird, also in diesem Falle auch kein Nachsteuersignal am VAT-Empfängereingang erzeugt. Bei Abweichungen von der Sollstellung liefert der VAT-Empfänger dem Antennensteuergerät Nachsteuerspannungen zu, die die Antenne automatisch auf ihre Sollstellung ausrichten. Die Eigennachführung arbeitet

allerdings nur in dem Winkelbereich der Hauptkeule des Antennendiagramms, d.h. in unserem Falle bei Winkelabweichungen von etwa $\pm 0{,}1°$. Ist der Satellit einmal mit der Bandsteuerung „eingefangen", so genügt für die weitere Verfolgung die Eigennachführung. Die Ausrichtegenauigkeit beträgt dabei einige Bogensekunden.

Die empfangene Mikrowellenenergie des Nachrichtenweges, die von der Antenne aus in einem Rundhohlleiter den VAT-Koppler durchläuft, gelangt zum Diplexer, der sie dem Empfänger zuführt. Dieser besteht aus einem rauscharmen Vorverstärker, d.i. ein Rubin-Maser, einem konventionellen 4-GHz-Richtfunkempfänger und einem Frequenzdemodulator, der mit Frequenzgegenkopplung arbeitet und das Signal des Basisbandes abgibt. Ueber den Diplexer wird der Antenne die Energie des Sendeteils zugeführt; dieser besteht aus einem Frequenzmodulator, in dem mit dem zu sendenden Basisbandsignal eine Zwischenfrequenz frequenzmoduliert wird, einem konventionellen 6-GHz-Richtfunksender mit einigen Watt Sendeleistung und einem Wanderfeldröhren-Leistungsverstärker mit etwa 2 kW Leistung.

Nach dieser groben Funktionsübersicht seien die Firmen erwähnt, die wesentlich an dem Projekt beteiligt waren:
Sämtliche Geräte für die Antennennachführung (Antennennachsteuergerät und Servoverstärker, VAT-Koppler und VAT-Empfänger) und der Maser wurden von den Bell-Laboratorien, der hydraulische Antrieb von der Firma Vickers, die Magnetbänder und die Rechner von der Firma IBM und der Radom von der Firma Birdair aus den USA geliefert.

Die Antenne wurde von der Firma Siemens & Halske AG. entwickelt und von der Firma MAN gebaut; ferner lieferte S & H die restlichen Teile, wie Diplexer, den Richtfunkempfänger und den gesamten Sendeteil; dazu gehört auch die Spezialentwicklung der 2-kW-Wanderfeld-Leistungsröhre. Aufbau und Betreuung der Antennensteuerungsanlage lag in der Verantwortung der Firma Telefunken.

3. Die Einzelbausteine

a. *Das Antennengebäude:*

Das Antennengebäude besteht aus zwei Betonfundamenten, dem Radom und einigen Betriebsräumen. Der Radom ist auf dem einen Fundament, einem Betonring von 45 m Durchmesser, mon-

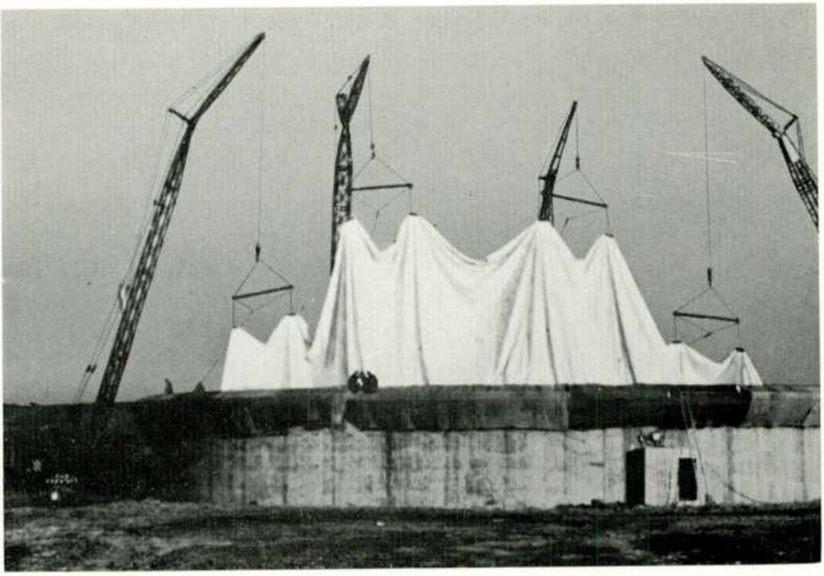


Bild 3
Montage des Radoms

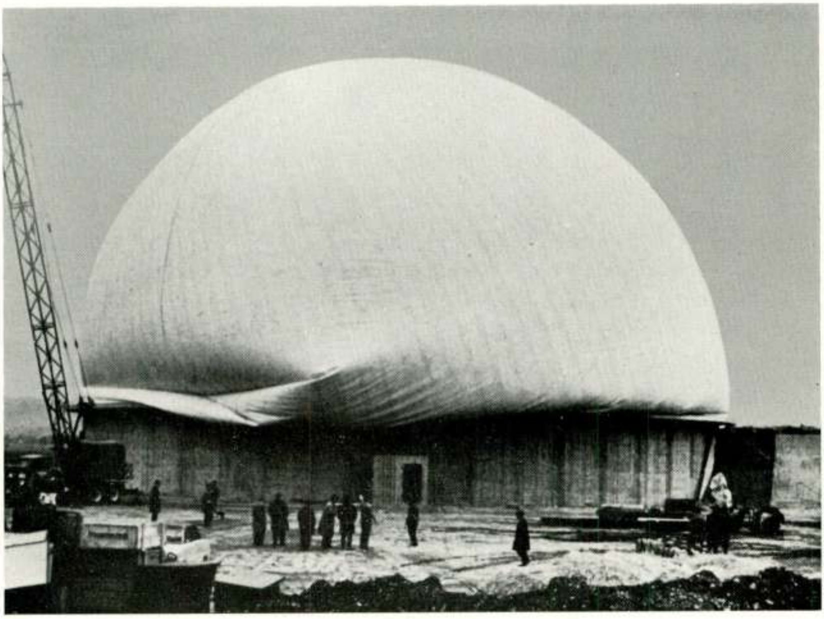


Bild 4
Aufblasen des Radoms

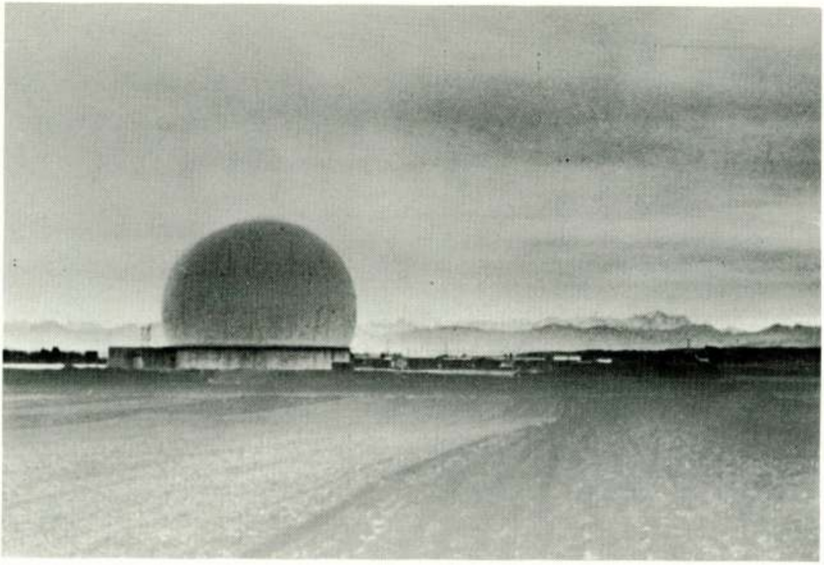


Bild 5
Radom nach Fertigstellung

tiert. Die Antenne selbst ist auf einer davon getrennten, zentral im Innern des äusseren Ringes befindlichen Betonkonstruktion von etwa 12 m Durchmesser montiert, welche in etwa 2 m Tiefe im Erdboden verankert ist. Der Boden besteht aus einer etwa 40 m tiefen Kiesschicht, die vor dem Bau bis zu 10 m Tiefe verdichtet wurde.

Bild 3 zeigt eine Aufnahme während der Montage des Radoms, Bild 4 während des Aufblasevorgangs und Bild 5 den fertig aufgeblasenen Radom mit Blick auf die Alpen; unter normalen Wetterverhältnissen ist der notwendige Luftüberdruck etwa 50 mm Wassersäule. Die Höhe des Radoms über dem Erdboden ist ca. 40 m und sein Durchmesser 48 m. Er besteht aus einem Kunststoff mit einer Wandstärke von 1,8 mm und wiegt ca. 13 t. Die Antenne wurde nach Fertigstellung des Radoms im Oktober 1963 während des Winters 1963/64 in gepflegter Atmosphäre im Radom montiert.

b. *Die Antenne*

Für das in Raisting benutzte Antennenprinzip war das Bestreben massgebend, die Vorzüge der verhältnismässig aufwendigen Hornparabolkonstruktion der amerikanischen Station in

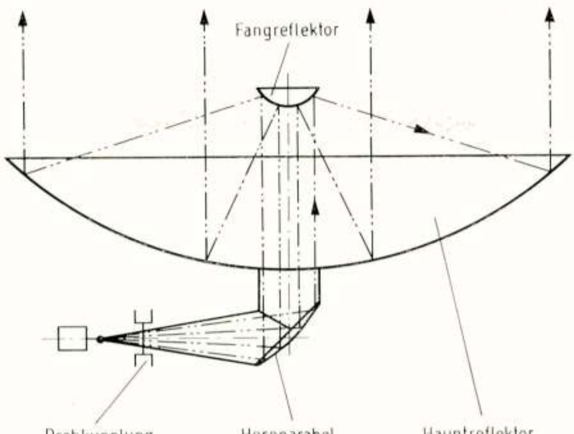


Bild 6

Cassegrain-Antenne mit Hornparabolspeisung (Prinzip)

Andover mit einer billigeren Konstruktion zu erreichen. Hier sind einerseits die ausgezeichneten elektrischen Eigenschaften der Andover-Antenne bezüglich Nebenkeulen und damit geringer Rauschtemperatur zu erwähnen, zum anderen in konstruktiver Hinsicht die Tatsache, dass der dicht hinter der Antenne befindliche Betriebsraum bei ihren Elevationsbewegungen fest stehen bleibt.

Mit dem in Bild 6 gezeigten Prinzip wurden praktisch die gleichen guten Eigenschaften erreicht. Als Hauptreflektor wird ein Rotations-Parabolspiegel verwendet, der sich wegen seiner Symmetrie am einfachsten herstellen lässt. Die Energie wird über einen kleinen Hornparabol im Scheitel der Antenne eingespeist, verlässt in einer schon gut vorgebündelten bereits verhältnismässig ebenen Wellenfront den Hornparabol und wird von einem Fangreflektor nach dem Cassegrain-Prinzip auf den Hauptreflektor zurückgeworfen, von wo sie in ebener Wellenfront ausgestrahlt wird.

Bei dieser Anordnung ist, ebenso wie bei der Bell-Antenne, mit Hilfe einer Mikrowellendrehkupplung die Spitze der Einspeisung und damit der dort angeschlossene Empfänger unabhängig von den Elevationsbewegungen der Antenne. Ausserdem ist der Rauschbeitrag der Antennenzuleitung vernachlässigbar klein, da vom Einspeisungspunkt weg alle Hohlleiter sehr grosse Dimensionen und damit unmessbar kleine Verluste haben. Die Abmessungen der wichtigsten Teile sind:

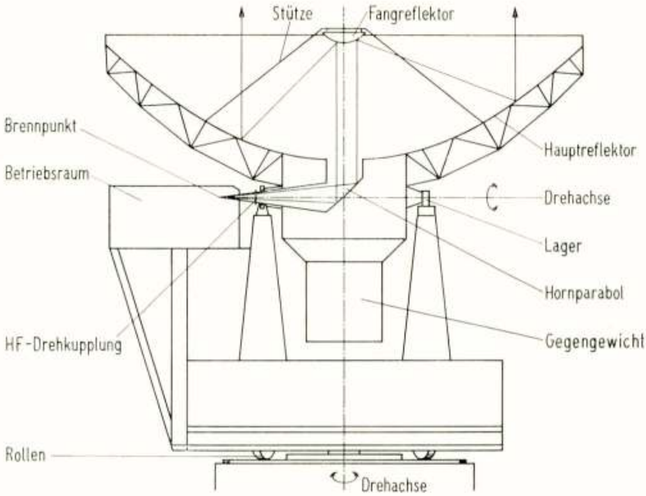


Bild 7
Cassegrain-Antenne mit Hornparabolspeisung
(stilisierte Zeichnung des Modells)

Hauptreflektordurchmesser — 25 m,
Hilfsreflektordurchmesser — 2,3 m,
Hornparabolöffnung im
Scheitel des Hauptreflektors — 1,8 m.

Bild 7 zeigt eine Skizze der gesamten Antennenkonstruktion. Man erkennt das Prinzip des vorigen Bildes, ausserdem die Elevationslagerung mit der Drehachse und den Lagerböcken. Die ganze Anordnung ruht auf einer ringförmigen stählernen Laufschiene, die mit höchster Präzision in das Betonfundament eingegossen ist (Maximale Abweichung von der Horizontalen $< 0{,}2$ mm), und kann auf dieser Laufschiene mit Rollen in der Azimutrichtung gedreht werden. Links oben ist der obere Betriebsraum, in den die Spitze des Hornparabols einmündet und in dem der komplette Empfangsteil mit Maser und dem Hochfrequenzteil des VAT mit VAT-Koppler untergebracht ist. Zur Auswuchtung ist ein Gegengewicht angebracht, das im Bild zwischen den Lagerböcken zu erkennen ist; im unteren Teil des Bildes ist der untere grössere Betriebsraum, in dem der Sender mit seiner Stromversorgung, die restlichen VAT-Geräte und das Antennensteuergerät untergebracht sind, zu sehen. Das Gewicht der auf den Laufschienen sich drehenden Konstruktion beträgt etwa 280 t. Die Parabolkontur, die aus Aluminium-



Bild 8
Erdefunkstelle Raisting — Antennenanlage im Aufbau

platten zusammengesetzt ist, welche von einer Stahlgitterkonstruktion getragen werden, hat eine Genauigkeit von 1 mm in jeder Stellung.

Bild 8 zeigt ein Photo, das während der Aufbau-Montage entstand, und Bild 9 ein Photo der fertigen Antenne. Auf beiden Bildern sind die vorhin geschilderten Einzelheiten zu erkennen.

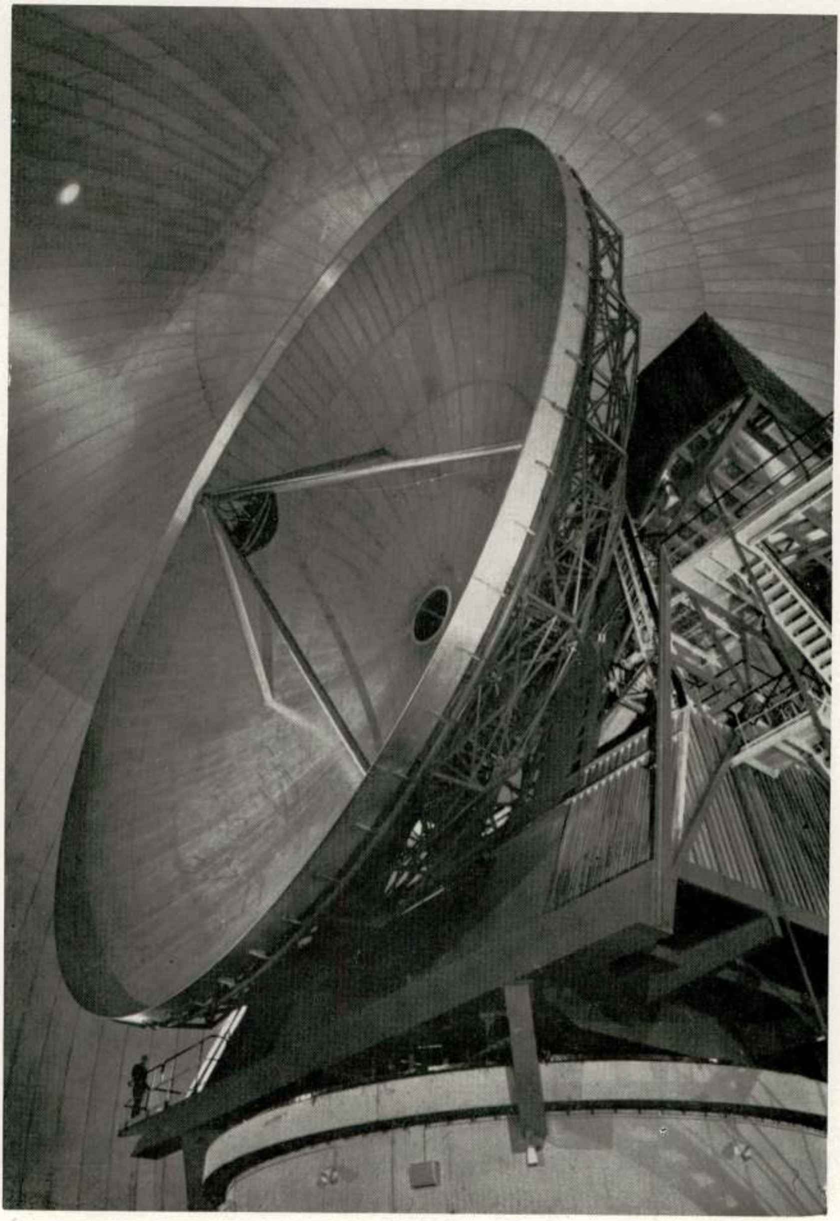


Bild 9
Erdefunkstelle Raisting — Antennenanlage

Bild 10 zeigt das gemessene Diagramm der Antennenstrahlung. Die Strahlbreite der Hauptkeule ist etwa $0{,}2^0$. Im Bereich ausserhalb $\pm 10^0$ von der Hauptkeule entfernt sind die Neben-

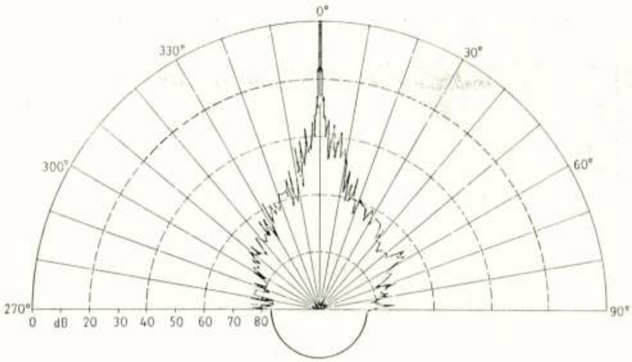


Bild 10
Angenähertes Azimutdiagramm bei 6,4 GHz

zipfel mehr als 50 dB und im Bereich ausserhalb ± 20° mehr als 60 dB gedämpft. Im rückwärtigen Bereich beträgt die Dämpfung der Nebenstrahlung mehr als 80 dB.

Bild 11 zeigt zwei Antennendiagramme für den VAT-Koppler, und zwar einmal die H_{11y}-Komponente (gestrichelte Kurve) die wie die Hauptkeule wieder eine Breite von etwa 0,2° hat, und zum anderen die für die Eigennachführung massgebende E_{01}-Komponente. Man erkennt die damit erreichbare hohe Peil-

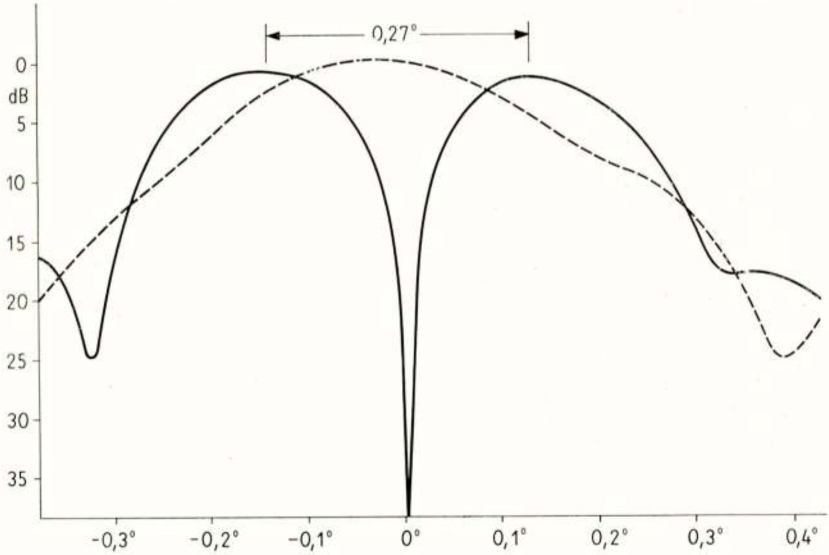


Bild 11
Peildiagramm über VAT-Koppler
(Elevation E_{01} — ausgezogene Kurve und H_{11y} — gestrichelte Kurve)

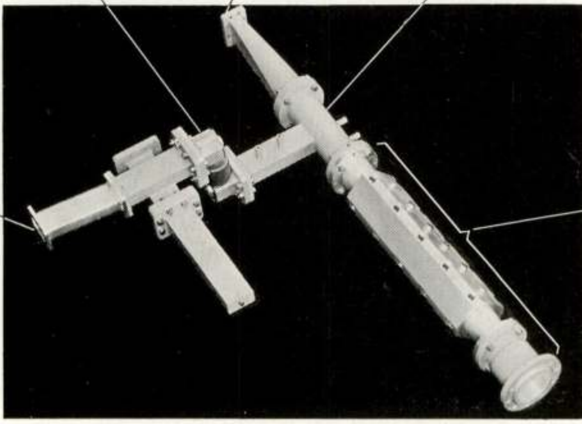


Bild 12
Sende-Empfangsweiche

schärfe. Der Einbruch gegenüber ihren bei $\pm 0{,}14^0$ liegenden Maxima ist ungefähr 40 dB.

Der Antennengewinn wurde bei 4 GHz zu 58,1 dB und bei 6 GHz zu 61,5 dB gemessen. Die Antenne hat damit dieselben Gewinne wie die Andover-Antenne. Aus dem Antennendiagramm wurde die Rauschtemperatur der Antenne allein für die Zenithstellung zu etwa 5^0 K und für 10^0 Elevation zu etwa 10^0 K errechnet. Auf die Messung der Gesamtrauschtemperatur und ihre Anteile kommen wir später noch zurück.

c. *Die Sende-Empfangsweiche (Diplexer)*

Zur Trennung von Sendezweig und Empfangszweig dient die in Bild 12 gezeigte Weiche; sie besteht aus zwei Teilen mit verschiedenen Funktionen, und zwar aus dem Polarisationswandler und der Polarisationsweiche. Die Satelliten „Telstar" und „Relay" arbeiten mit zirkularer Polarisation, und zwar rechts zirkular für die Sendewellen und links zirkular für die Empfangswellen. Der Polarisationswandler verwandelt die beiden zirkular polarisierten Wellen in zwei aufeinander senkrecht stehende linear polarisierte Wellen. Die Polarisationsweiche trennt diese beiden in zwei Wege auf. Die gesamte Anordnung entkoppelt die beiden Wege um mehr als 40 dB. Damit vom Sender nicht zuviel Energie auf den Masereingang gelangt, ist zusätzlich noch ein Tiefpass an den Empfängerausgang der

Weiche angeschaltet mit einer Dämpfung von etwa 50 dB bei 6 GHz, so dass die gesamte Entkopplung zwischen Sendereingang und Empfängerausgang mehr als 90 dB beträgt. Das Verhältnis zwischen Senderleistung und Nutzempfangsleistung ist zwar mehr als 150 dB (ca. 2 kW und ca. 10^{-12} W); die Entkopplung von 90 dB ist jedoch ausreichend, da der Maser selbst noch Bandpasseigenschaften hat.

Vor dem Sendereingang der Weiche befindet sich ein Tiefpass, der verhindert, dass Oberwellen des Senders abgestrahlt werden.

d. *Der Empfängerteil*

Der Rubinmaser als erste Stufe des Empfängers hat eine Bandbreite von 16 MHz bei einer Verstärkung von etwa 40 dB;

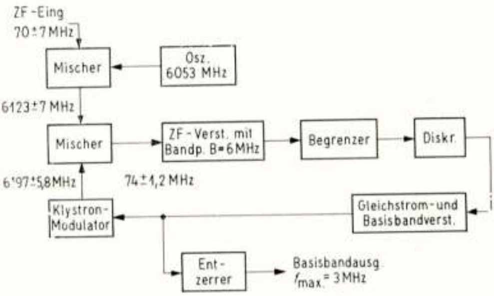


Bild 13

Blockschaltbild des FMFB-Empfängers

seine Rauschtemperatur beträgt bei Kühlung auf die Temperatur des flüssigen Heliums etwa 4° K. Der Maser ist mit dem notwendigen Dewargefäss und dem Permanentmagneten in einem Gestell untergebracht. Ein davon getrenntes Gestell enthält die Pumpquelle, d.h. ein Klystron, das bei etwa 30 GHz schwingt, und die dazugehörigen geregelten Netzgeräte.

Die nachfolgenden Stufen bestehen, wie bei einem modernen konventionellen Richtfunkempfänger, aus Kristallmischer mit dazugehörigem Ueberlagerungsoszillator und transistoriertem Zwischenfrequenzverstärker mit einer Bandmittenfrequenz von 70 MHz. Die Dämpfungskurven von Maser und Empfänger sind so aufeinander abgestimmt, dass sich eine resultierende Bandbreite von 25 MHz ergibt.

Am Ausgang des ZF-Verstärkers liegt ein spezieller Frequenzdemodulator mit Frequenzgegenkopplung. Die Prinzipschaltung zeigt Bild 13. Die 70-MHz-Schwingung wird zunächst wie-

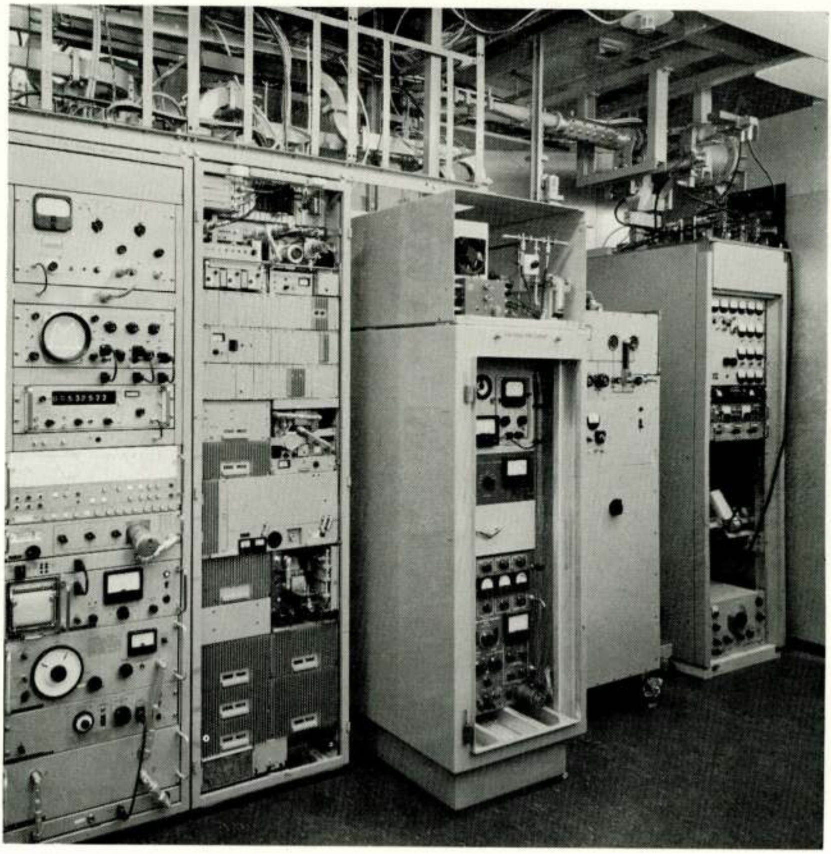


Bild 14
Empfängerraum

der auf eine Frequenz von etwa 6 GHz heraufgesetzt und dann mit Hilfe eines frequenzmodulierbaren Klystron-Ueberlagerungsoszillators wieder in die ZF von 70 MHz herabgesetzt. Nach ausreichender Verstärkung und Begrenzung wird die 70-MHz-Schwingung in einem üblichen Frequenzdiskriminator demoduliert. Die demodulierten Basisbandsignale modulieren nun das Ueberlagerungsklystron in der Frequenz so, dass eine Frequenzgegenkopplung auftritt, d.h. eine Reduktion des Frequenzhubs der ZF-Schwingungen. Die Bandbreite des ZF-Verstärkers kann so wesentlich geringer gewählt werden als auf dem Uebertragungsweg. Damit wird die den Träger störende Rauschleistung verringert, und zwar proportional zur Bandbreitenverminderung; man erhält so eine Verbesserung des Verhältnisses der Trägerleistung zur Rauschleistung und damit eine Verbesserung des

Schwellwertes, bei dem die Frequenzdemodulation versagt. Die Schwellwertsverbesserung beträgt in unserem Falle etwa 5 dB.

Alle im vorhergehenden beschriebenen Geräte sind im oberen Betriebsraum aufgestellt. Ein Photo der Gestellreihe zeigt Bild 14. Rechts oben im Bild über den Gestellen ist die Mündung des Hornparabols zu erkennen, daran anschliessend der VAT-Koppler und die Sende-Empfangsweiche; von rechts nach links stehen der VAT-Empfänger, der Maser, das Pumpgestell für den Maser, der 4-GHz-Empfänger und das Empfänger-Messgestell.

e. *Der Sendeteil*

Dieser enthält den Sendeteil des neuen 6-GHz-Richtfunksy-

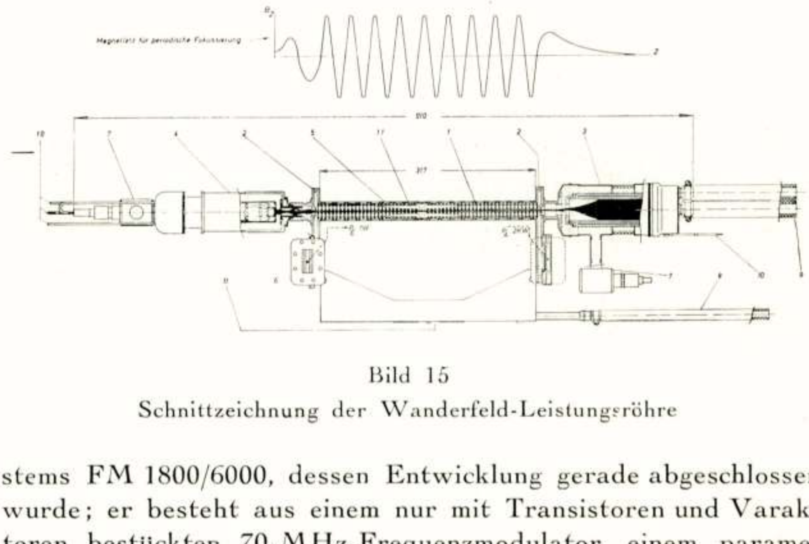


Bild 15
Schnittzeichnung der Wanderfeld-Leistungsröhre

stems FM 1800/6000, dessen Entwicklung gerade abgeschlossen wurde; er besteht aus einem nur mit Transistoren und Varaktoren bestückten 70-MHz-Frequenzmodulator, einem parametrischen Varaktor-Sendeumsetzer mit zugehörigem Sendeoszillator und einem 6-GHz-Wanderfeldverstärker mit einer Leistung von etwa 10 W. Diese steuert einen Wanderfeldverstärker aus, der im Band vom 5,9 bis 6,4 GHz breitbandig eine Leistung von etwa 2 kW abgibt. Dieser Leistungsverstärker wurde speziell für Satelliten-Erdstationen entwickelt; das Konstruktionsprinzip der Wanderfeldröhre ist in Bild 15 dargestellt. Die Verzögerungsleitung besteht aus einer Vielzahl von stark gekoppelten Resonanzkreisen, deren gemeinsame Achse der Elektronenstrahl durchläuft. Diese Struktur hat, im Gegensatz zu einer Wendel, den Vorzug guter Wärmeableitung. Der Elek-

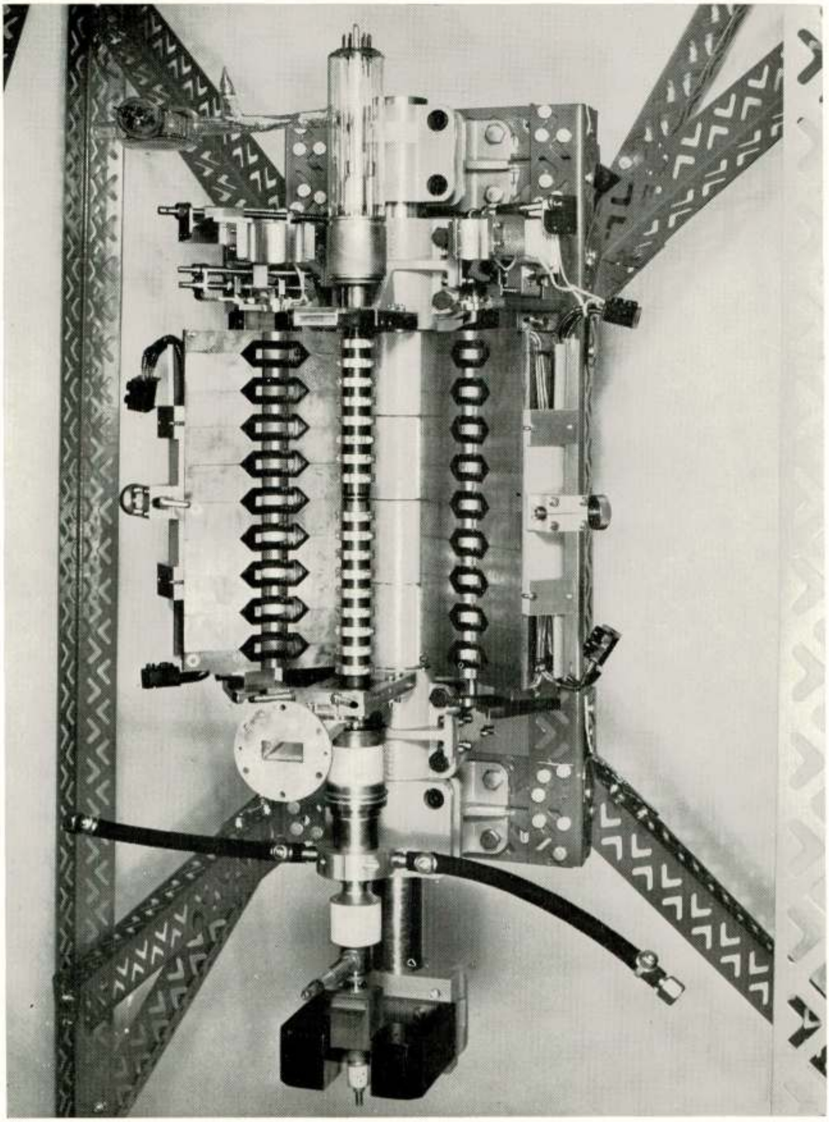


Bild 16
Wanderfeldröhre YH 1040;
Röhre im geöffneten Magnetsystem

tronenstrahl mit einer Stromstärke von etwa 1 A wird mit Hilfe eines durch Permanentmagneten erzeugten räumlich periodischen Wechsel-Magnetfeldes fokussiert. In der Mitte der Leitung befindet sich eine Dämpfungsschicht. Das Photo der Röhre im geöffneten Magnetsystem zeigt Bild 16. Die Betriebsdaten sind:

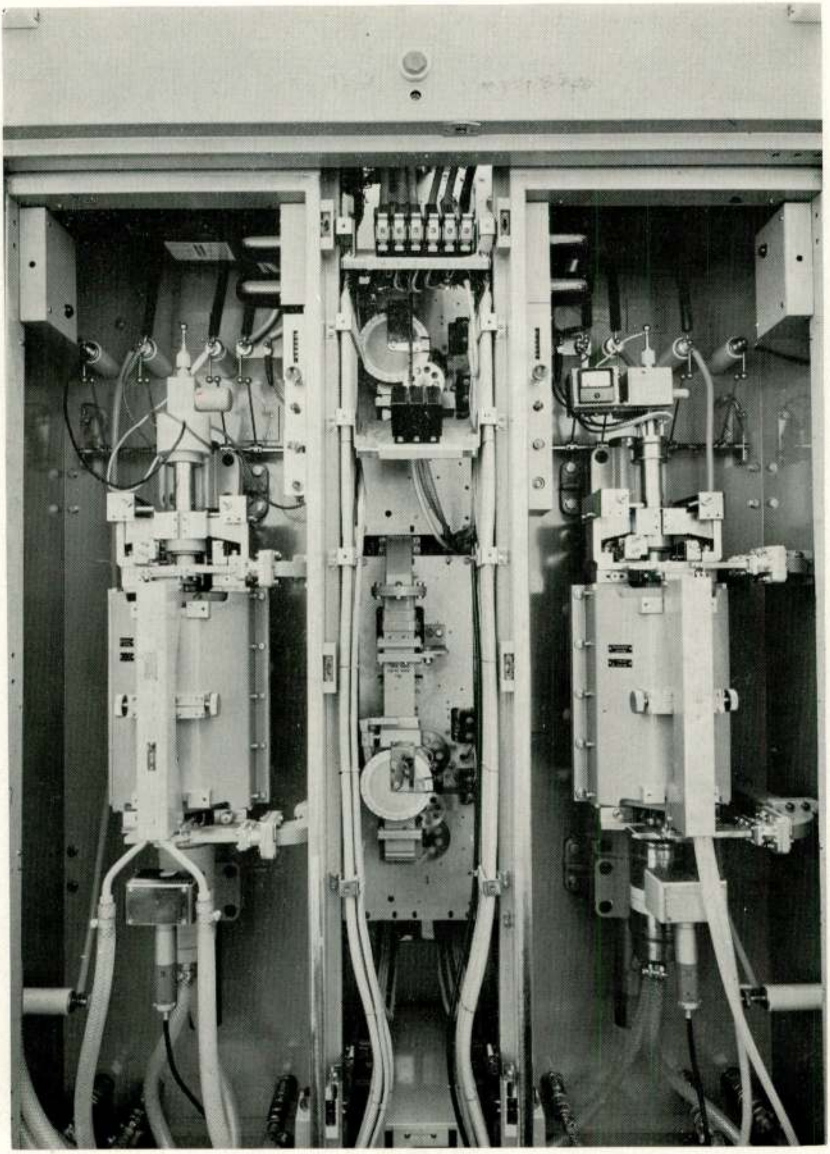


Bild 17
Sender Raisting — 2-kW-Leistungsstufe

Leitungsspannung	17 kV
Kollektorspannung	12 kV
Strahlstrom	1 A
Kollektorverlustleistung	ca. 12 kW.

Diese Verlustleistung wird durch ein Wasserkühlsystem abgeführt; in dem Kühlkreislauf ist auch die Verzögerungsleitung eingeschlossen. In Bild 17 ist ein Photo des gesamten Leistungssenders zu sehen, der für Betrieb und Ersatz zwei Verstärker enthält. Bei vorgeheizter Röhre ist der Ersatzsender nach Druckknopfbetätigung innerhalb weniger als 30 sec voll betriebsfähig.

Nach dem gleichen Konstruktionsprinzip wird derzeit eine Röhre für eine Ausgangsleistung von etwa 5 kW entwickelt.

4. *Messergebnisse an der Gesamtanlage und Ausblick auf die Weiterentwicklung*

Die Anlage war im Oktober 1964 zu den Olympischen Spielen in Tokio empfangsbereit und arbeitete sofort zufriedenstellend. Wegen ihrer besonderen Bedeutung wurde danach die Rauschtemperatur unter allen denkbaren Betriebszuständen sorgfältig untersucht. Folgende Werte wurden ermittelt:

90°	Elevation (Zenithstellung)	30° K
60°	„	27° K
10°	„	40° K
5°	„	50° K

Bei 90° Elevation setzen sich die Rauschanteile etwa folgendermassen zusammen

Antenne	5°
Radom	10°
Maser	5°
Leitungen (VAT-Koppler Sende-Empfangs-Weiche)	ca. 10°
	30°

Nach abschliessenden Uebertragungsversuchen mit den Satelliten „Relay" und „Telstar" wird die Anlage zur Zeit auf die Versuche mit dem ersten Comsat-Satelliten „Early Bird" umgestellt. Die Umrüsteng wird vor allem durch folgende abweichenden Eigenschaften des Early Bird verursacht: Lineare statt zirkulare Polarisation, andere Sende- und Empfangsfrequenz, anderer Frequenzhub und andere Basisbandbreite.

Nach der Realisierung eines so grossen Projektes stellt man sich die Frage, wie eine Satellitenstation in Zukunft aussehen

wird. Nach den bisherigen Erfahrungen sind wir der Meinung, dass an der Grundkonzeption nichts geändert zu werden braucht, d.h. wir würden das Antennenprinzip und den Radom beibehalten. Verbesserungen und Vereinfachungen und damit Verbilligungen sind möglich; z.B. können der Radomdurchmesser und die Wandstärke verkleinert werden. Wir erhoffen uns davon eine Reduktion des Radom-Rauschtemperaturanteils; die hydraulischen Antriebe können durch wesentlich billigere Elektromotor-Antriebe ersetzt werden. Wesentlich einfachere Antennen-Nachführgeräte sind konzipiert und bereits in Entwicklung. Eine Aufgabe für Weiterentwicklungen entsteht aus der Tatsache, dass die gesamten Richtfunkbereiche 3,7 bis 4,2 GHz und 5,9 bis 6,4 GHz für Nachrichtensatellitensysteme verwendet werden; dies führt zu der Notwendigkeit von breitbandigen durchstimmbaren Sende- und Empfangseinrichtungen.

Manuscript ontvangen op 26 maart 1965.